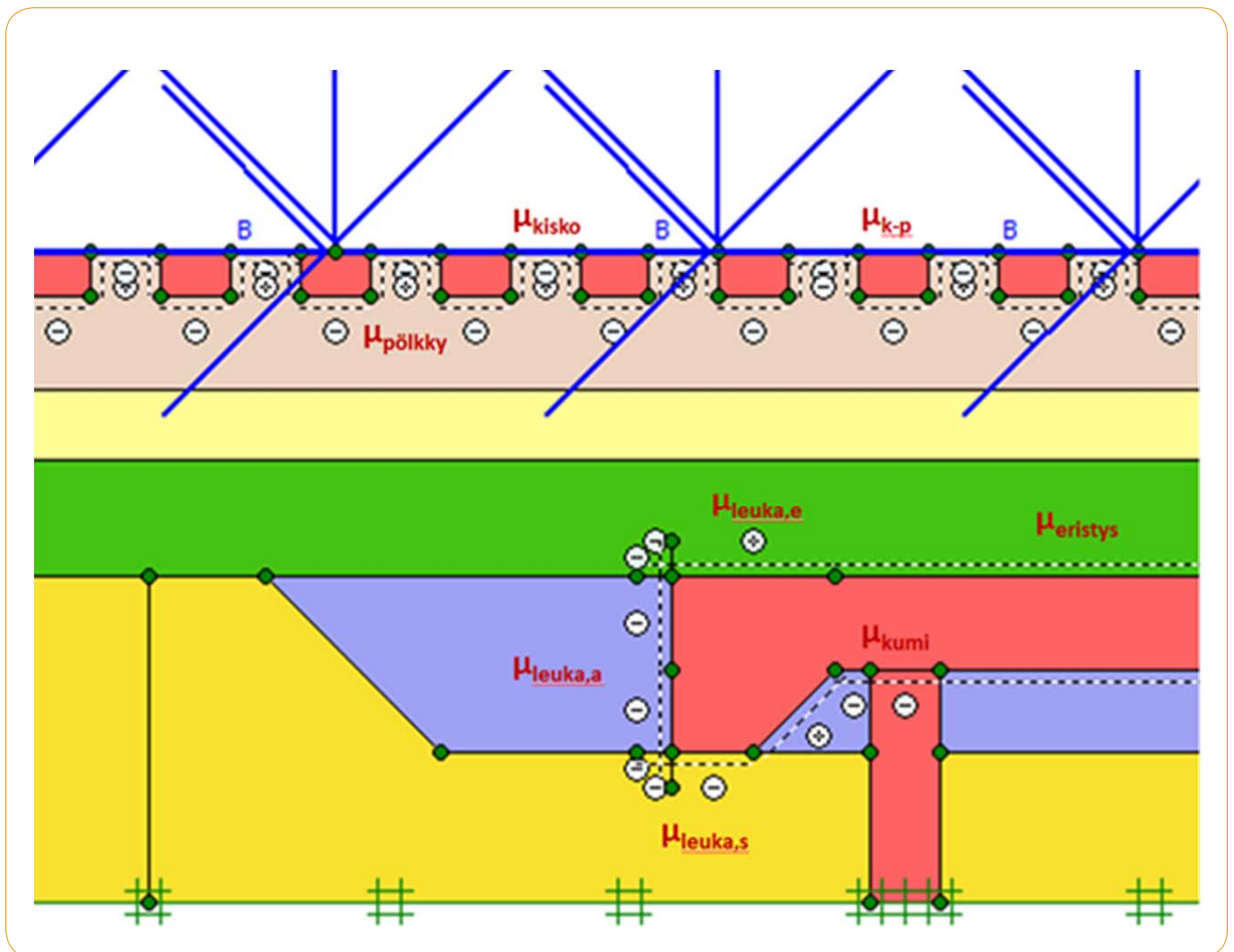


ROBERT NEMLANDER

## Junan jarrukuorman välittyminen pengerialaalle









*Kannen kuva: Vaunut.org*







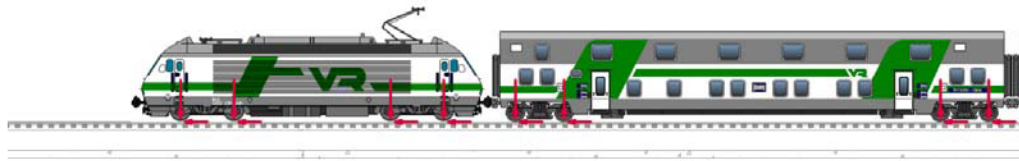








*(Kuva 1.1)*



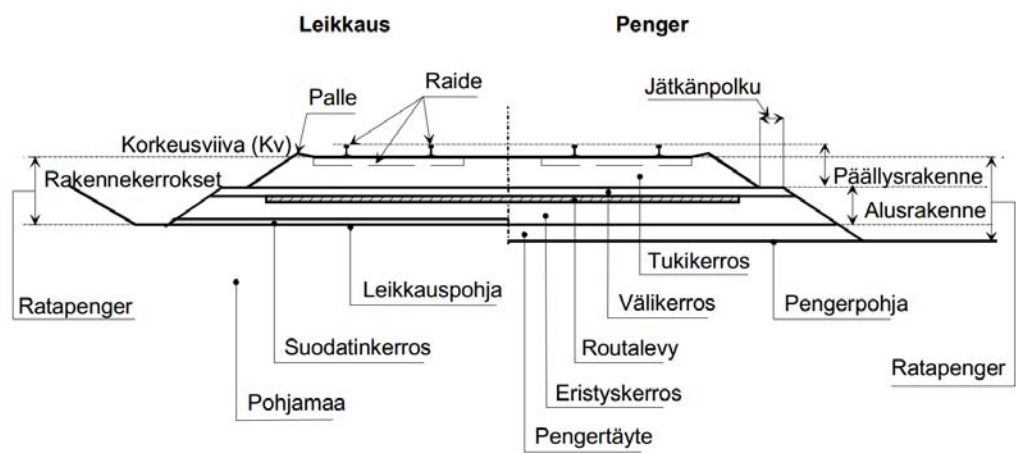
*Kuva 1.1 Havainnekuva junakuormien (pystysuuntainen akselikuorma ja vaakasuuntainen jarrutuskuorma) määrittelyperiaatteesta ja tutkittavista radan rakennekerroksista (kisko, pölkylt, maarakennekerrokset ja pengerialta) kaksikulotteisessa mallinnusohjelmassa.*

- 
- 
- 
- 
- 
- 

- 
-

(railway embankment)

(Kuva 2.1)



Kuva 2.1. Radan rakenneosien nimityksiä [Liikennevirasto 2014b].

(under sleeper pad (USP), sleeper soffit pad)

(frost insulation board)

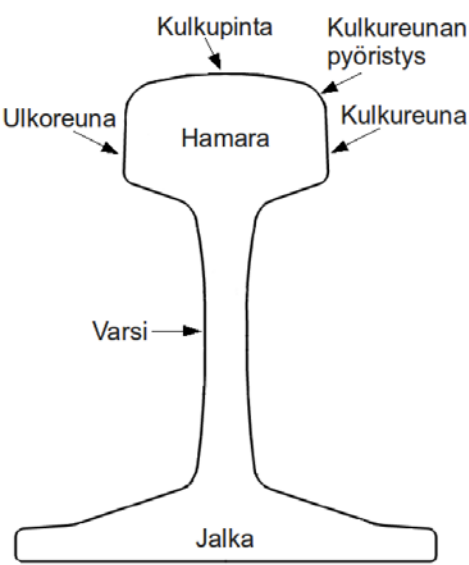
(Kappale )

Ra-

dan pystysuuntainen jäykkyys ja sen mittaaminen

(rail)

(head) (web) (foot) (Kuva 2.2)



Kuva 2.2 Kiskon eri alueiden nimitykset [Kauppinen 2011].

$EI$   $I$   $E$

(Taulukko 2 )  
(Kappale 6.5.2 )

(Kappale 6.4.2 )

Taulukko 2.1. Kiskon ominaisuudet. [Liikennevirasto 2008]

Parametri	Tunnus	Arvo

(rail fastener)

Kuva 2.3

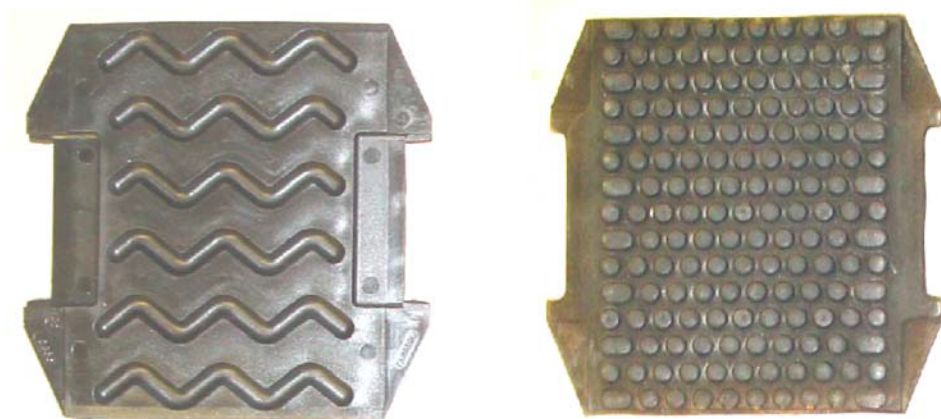
- 
- 
- 
- 

(Kuva 2.4)

- 
- 
- 



*Kuva 2.3 Suomessa käytössä oleva Vossloh Skl 14 -kiinnitys betoniratapölkkyyn [Peltokangas et al. 2013].*



Kuva 2.4 Välilevyjä. Vasemmalla HDPE- ja oikealla nastapinnoitettu kumivälilevy [Kaewunruen & Remennikov 2006].

(sleepers)

- 
- 
- 
- 
-

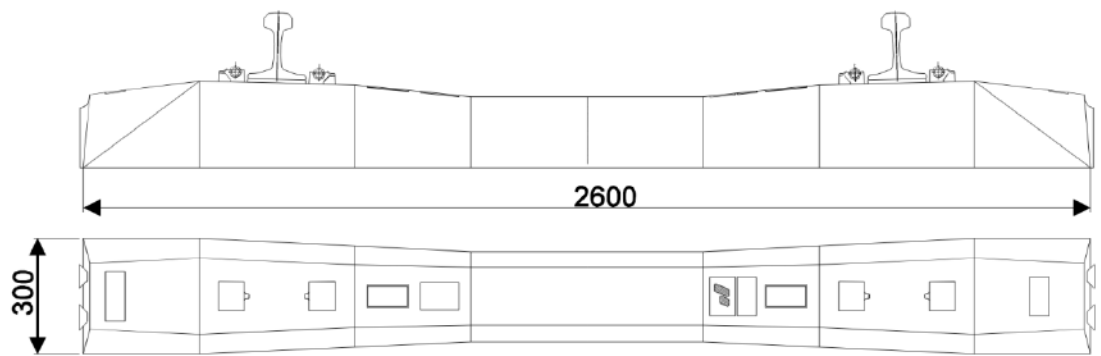
2.5, 2.6

*Kuva*



*Kuva 2.5*      *Betoniratapölkky BP89, Pandrol e-clip kiinnitys [Ratahallintokeskus 2002].*





Kuva 2.6 Etummaisena kaksi Parman BP89- ja taaempänä kaksi Lujabetonin B97-betoniratapölkkyä [Peltokangas et al. 2013].

(ballast layer)

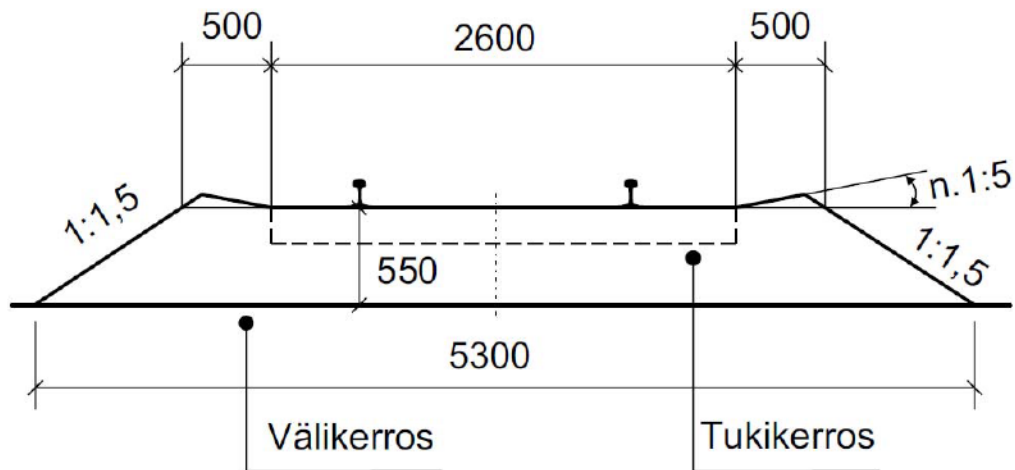
•  
•  
•

dot

Raidesepelin tekniset toimituseh-  
Päällysrakennetöiden yleiset laatuvaatimukset (PYL)

Kuva 2.7

## Suoralla



Kuva 2.7 Sepelitukikerros suoralla jatkuvakiskoisessa betoniratapölkkyraiteessa. Sallii liikennöintiänopeuden  $>160$  km/h [Ratahallintokeskus 2002].

Kuva 2.8



Kuva 2.8 Esimerkkikuva tukikerroksesta Oikoradalla liikennepaikkavälillä Mäntsälä–Sipilä. [Peltokangas et al. 2013]

- 
- 
- 
- 

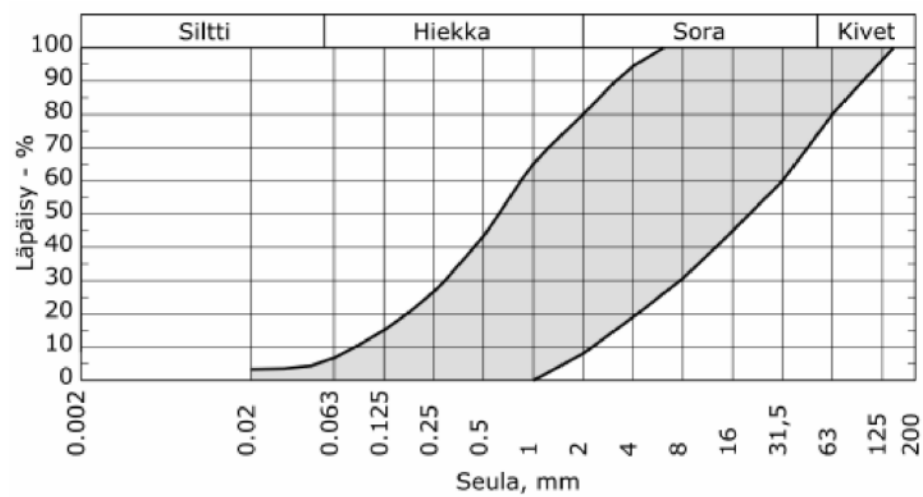
*(subballast layers)*

*(Kuva 2.9)*

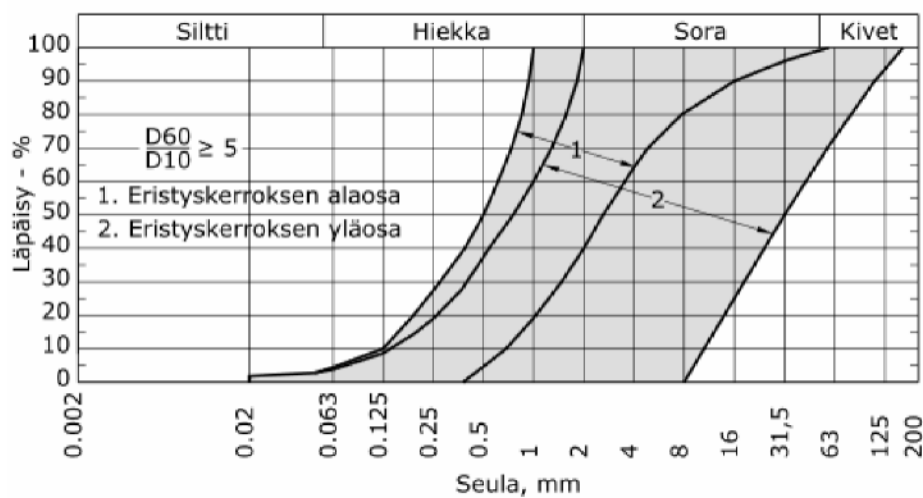
*(Kuva 2.10)*

*(Kuva*

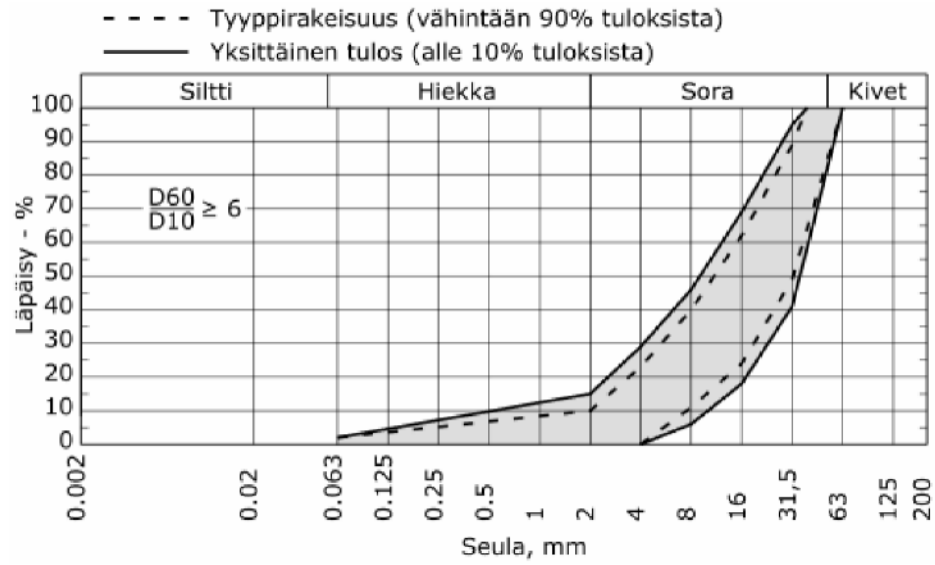
*2.11)*



Kuva 2.9 Hiekasta ja sorasta tehtävän välikerroksen rakeisuusvaatimukset [InfraRYL 2010].



Kuva 2.10 Hiekasta ja sorasta tehtävän eristyskerroksen rakeisuusvaatimukset [InfraRYL 2010].



Kuva 2.11 Eristys- ja välikerroksen kalliomurskeen rakeisuusvaatimukset [InfraRYL 2010].

(subgrade, subsoil)

*(pile slab)*

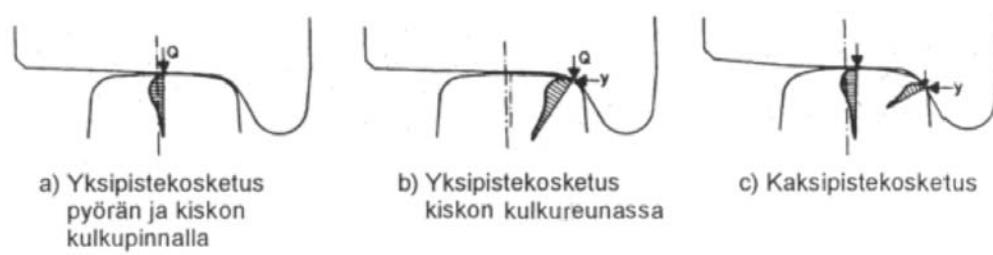
•

•

•

•

(Kuva 3.1)

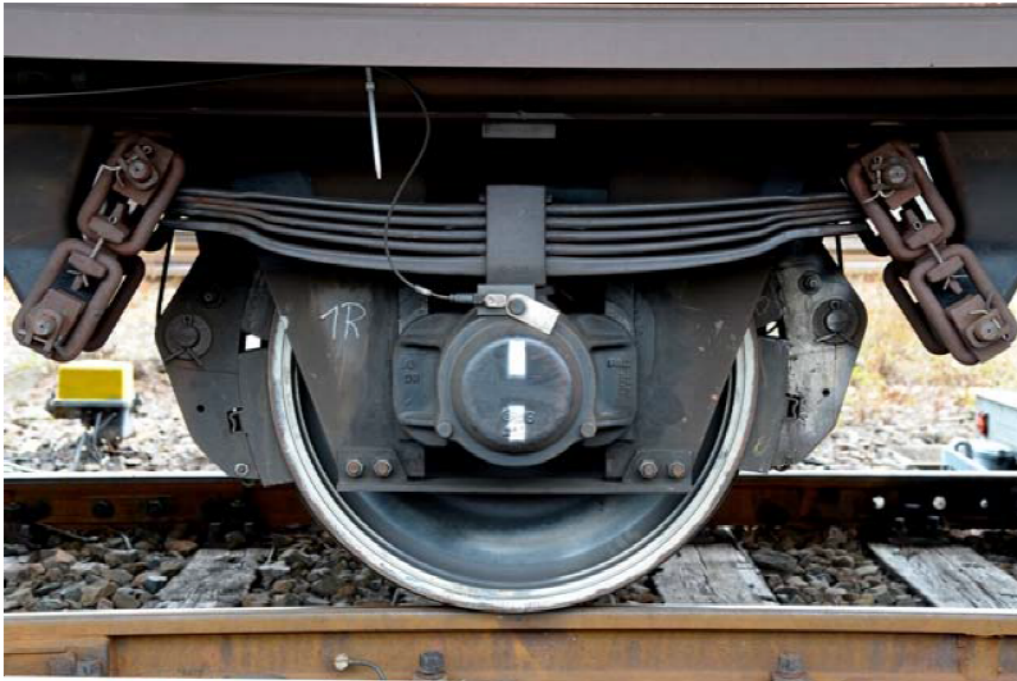


Kuva 3.1 Pyörän ja kiskon välinen kosketus. [Liikennevirasto 2011a]

- 
- 
- 
- 
- 

(Taulukko 3.1)

(Kappale 4.3.2 )



Kuva 3.2 Junan pyörän kontakti raiteeseen [Kuva: Railway-technology.com 2013].

Taulukko 3.1 Kaluston sallittua akselipainoa vastaavan mitoituskuormakaavion tunnusukset sekä vastaavat staattiset nauhakuormien ja akselikuormien arvot [Liikennevirasto 2013].

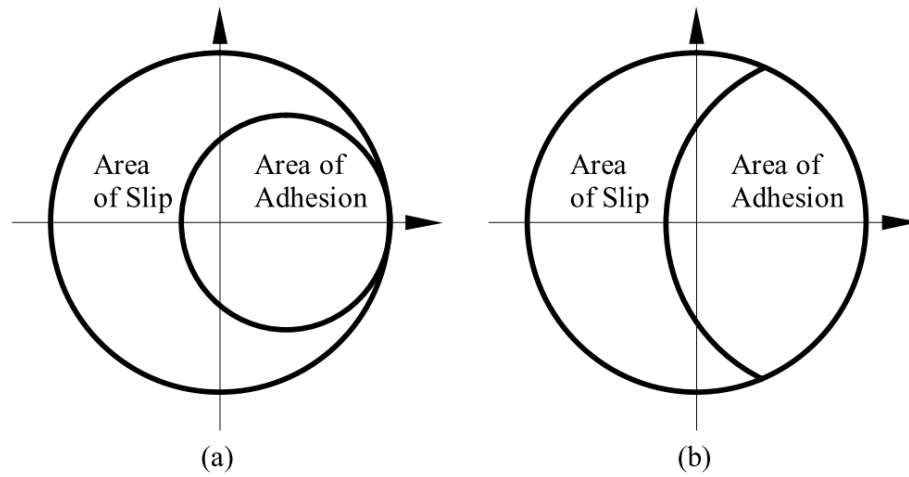
Kaluston sallittu akselipaino [kN]	Mitoituskuormakaavion tunnus	Mitoituskuormakaavion nauhakuorma, $q_{vk}$ [kN/m]	$\Delta q_{vk}$ [kN/m]	Mitoituskuormakaavion akselikuormat, $Q_{vk}$ [kN]
170	LM71-17	60	58	188
225	LM71-22,5	80	76	250
250	LM71-25	88	84	275
300	LM71-30	106	102	333
350	LM71-35	120	111	370



$$F_k = \mu F_n \quad (3.1)$$

missä  $F_k$  on kitkavoima,  $\mu$  on kitkakerroin ja  $F_n$  on pinnan normaalivoima.

Yhtäaikaisissa pyörimis- ja liukumiskontakteissa kitkakerroin ei ole enää Coulomb-tyyppinen. Tämä pätee esimerkiksi junan pyörän ja raiteiden väliseen kontaktiin. Kun pyörä liikkuu kiskotasoa pitkin, kontaktipinnalla esiintyy alueita, joissa ei ole suhteellista liikettä kappaleiden välillä (adheesio), ja toisaalta alueita, joissa tapahtuu suhteellista liukumista. Tarvitaan monimutkaisempaa mallia, joka ottaa huomioon ns. adheesion ja pintojen väliset liukumisalueet, joita ilmenee kontaktialueella (Kuva 3.3). [Popovici 2010], [Popov et al. 2002]



Kuva 3.3 Yhtäaikaisen pyörimis- ja liukumiskontaktin jako kontaktialueisiin (adheesio ja liukuminen) (a) Kalkerin [1966] mukaan ja (b) Hainesin ja Olertonin [1963] mukaan. [Popovici 2010]

Tällaisten mallien ratkaiseminen vaatii verkkopinnaksi (*mesh*) jaetun kontaktialueen numeerista laskentaa. Ensimmäisen tarkoitukseen osoitetun menetelmän kehitti Kalker vuonna 1966. Menetelmät kehittyivät ajan myötä ja viimeisin edistysaskel oli Popov et al.:n [2002] kitkakertoimen numeerinen arviointimenetelmä materiaaliominaisuuksien ja kuorman funktiona. Bucher et al. [2006] on suorittanut tuoreeltaan myös eri kokoluokan simulaatioita. [Popovici 2010.]

Popov et al.:n [2002] numeerisella arviointimenetelmällä on mahdollista määritellä junan pyörän ja raiteiden välinen kitkakerroin junan nopeuden funktiona. Menetelmän yleisessä muodossa on huomattava määrä muuttujia, joiden arvo riippuu käytettävästä junakalustosta ja kiskojen profiilista. Koska tarkoitus on keskittyä Suomen rataverkkoon, määritellään Suomessa käytössä olevan junakaluston ja kiskojen ominaisuudet ennen menetelmän esittelyä. Näin saamme arviointimenetelmällä tarkan kuvan kitkakertoimen kehittymisestä eri junakalustolla ja nopeuksilla Suomen rataverkolla.

Otetaan tarkastelun lähtökohdaksi uuden radan LM71-kuormakaavion akselikuormat  $Q_{vk}$  (Taulukko 3.1) ja Sr2-veturin pyörän halkaisija 1100 mm. Suomessa käytössä olevien yleisimpien junatyyppejen (Kuva 3.4) ominaisuuksia on esitelty seuraavassa taulukossa (Taulukko 3.2).



Kuva 3.4 Sr2-veturi [Karikoski 2012].

Kuva 3.5 Sm3 (Pendolino) [Karikoski 2010].

Taulukko 3.2 Suomessa käytössä olevien junatyyppien ominaisuuksia [Eonsuu et al. 1995].

Parametri	Junatyyppi		
	Sr2-veturi	Sm3 (Pendolino)	Sm6 (Allegro)

\* Oletetaan samaksi Sm6-junan vastaavan arvon kanssa.

(Taulukko 2 )

(Kuva 3.6)

Kuva 3.7



Laskelmissa pyörän normaalisäde  $r_n$  poikkeaa pyörän pyörimissäteestä  $r_o$ . Tämä johtuu siitä, että sylinterimäinen pyörä käyttäytyy erilailla kuin kartiomainen pyörä [Ayasse & Chollet 2006]. Jälkimmäinen on tilanne käytännössä. Normaalisäde  $r_n$  saadaan pyörimissäteestä  $r_o$  (pyörän halkaisijan puolikas: (Taulukko 3.2) ja kontaktipinnan kulman  $\gamma$  (vaihteluväli  $0^\circ \dots 1,43^\circ$ ) perusteella kaavasta:

$$\frac{1}{r_n} = \frac{\cos \gamma}{r_o} \quad (3.2)$$

Pyörimissäteestä  $r_n$  vaihteluväli on Sr2-veturille 550,0...550,2 mm ja Sm3/Sm6-junille 490,0...490,2 mm.

Ayasse & Chollet [2006] esittelee parametrien määrittämisen tarkemmin. Määritetään kertoimet A ja B, joista A kuvaa junan pyörää ja B kuvaa kiskoa:

$$A = \frac{1}{2r_n} \quad (3.3)$$

$$B = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{R_{wx}} + \frac{1}{R_{rx}} \right) \quad (3.4)$$

missä  $r_n$  on pyörän normaalisäde ja  $R_{wx}$  sekä  $R_{rx}$  ovat kiskon poikittaisen yläprofiilin ympyräkaarien säteitä. Kun kyseessä on kiskotyyppi 60E1 (Kuva 3.6):

$$R_{wx} = 300 \text{ mm}$$

$$R_{rx} = 80 \text{ mm}$$

Kaavoista 3.3 – 3.4 saadaan Sr2-veturille  $A = 0,000909 \text{ 1/mm}$  ja Sm3/Sm6-junille  $A = 0,00102 \text{ 1/mm}$ . Kaikille junatyypeille on sama  $B = 0,00792 \text{ 1/mm}$ .

Perinteinen laskentamenetelmä perustuu ellipsin puoliakselisuhteen määrittämiseen niin, että käytetään väliparametrina kulmaa  $\theta$ , joka on suhteen  $B/A$  funktio seuraavan kaavan mukaan: [Ayasse & Chollet 2006]

$$\cos \theta = \frac{|B-A|}{B+A} \quad (3.5)$$

Ellipsin puoliakseleiden  $a$  ja  $b$  mitat sekä kappaleiden keskipisteiden välisen etäisyyden vähennyskerroin  $\delta$  voidaan määrittää seuraavasti, jos  $a > b$ : [Ayasse & Chollet 2006]

$$a = m \left( \frac{3}{2} N \frac{1-v^2}{E} \frac{1}{A+B} \right)^{1/3} \quad (3.6)$$

$$b = n \left( \frac{3}{2} N \frac{1-v^2}{E} \frac{1}{A+B} \right)^{1/3} \quad (3.7)$$

$$\delta = r \left( \left( \frac{3}{2} N \frac{1-v^2}{E} \right)^2 (A+B) \right)^{1/3} \quad (3.8)$$

missä  $E$  on kimmomoduuli ja  $\nu$  on Poisson-luku. Oletetaan, että kisko ja pyörä ovat samaa materiaalia ja käytetään taulukkoarvoja (Taulukko 2.1).  $N$  on pyöräkuorma eli akselikuorman puolikas (Taulukko 3.1). Dimensiottomat kertoimet  $m$ ,  $n$  ja  $r$  määritetään suhteen  $g = n/m$  tai kulman  $\theta$  funktiona alla olevan taulukon mukaan (Taulukko 3.3).

Taulukko 3.3 Hertzin kertoimet ( $A/B < 1$ ) [Ayasse & Chollet 2006].

$\theta^\circ$	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
$g = n/m$	1	0.7916	0.6225	0.4828	0.3652	0.2656	0.1806	0.1080	0.0470	0
$m$	1	1.128	1.285	1.486	1.754	2.136	2.731	3.816	6.612	$\infty$
$n$	1	0.8927	0.8000	0.7171	0.6407	0.5673	0.4931	0.4122	0.3110	0
$r$	1	0.9932	0.9726	0.9376	0.8867	0.8177	0.7263	0.6038	0.4280	0

Junan pyörän ja kiskon välisen kontaktialueen sisälle kehittyy painejakauma, joka ellipsin muotoinen. Keskimääräinen paine on  $N/ab$  ja ellipsin keskelle muodostuva suurin kontaktipaine saadaan kaavasta: [Esveld 2001], [Ayasse & Chollet 2006]

$$\sigma_{\max} = \frac{3}{2} \frac{N}{\pi ab} \quad (3.9)$$

Otetaan Sr2-veturin pyörä koko tarkastelun vakioksi. Kaavojen 3.2–3.9 avulla määritetään jokaiselle LM71-kuormakaavion sallitulle akselipainolle maksimikontaktipaine, jota tarvitaan myöhemmässä vaiheessa Popov et al.:n numeerisessa kitka-kertoimen arviointimenetelmässä. Lasketaan kaavoilla 3.2–3.9 parametrit maksimikontaktipaineen  $\sigma_{\max}$  määrittämiseksi (Taulukko 3.4).

Ayasse & Chollet [2006] toteaa, että maksimikontaktipaine rautateillä on usein yli 1000 MPa. Esveldin [2001] laskelmien mukaan esimerkiksi 60 kN:n pyöräkuorma voi aiheuttaa yli 1000 MPa:n puristusjännityksen ja pienillä pyörillä puristusjännitys voi ylittää jopa 2000 MPa:n. Yllä olevassa taulukossa esitetty maksimikontaktipaineen vaihteluväli 2103...2635 MPa on korkea, mutta edustava näiden lähteiden valossa. Laskelmissa käytettyjen junatyypin pyöräkuorma on huomattavan suuri, mikä nostaa maksimikontaktipainetta.

Dynaamisissa pyörä-kisko -malleissa ns. Hertzin jousi on tärkeä. Jousen jäykkyys voidaan johtaa Hertzin teoriasta varsin monimutkaisesta yhtälöstä. Jos oletetaan ympyränmuotoinen kontaktialue ja otetaan keskimääräinen säde muista ympyränkaarista ja ympyröistä, voidaan määrittää seuraava yksinkertainen kaava: [Esveld 2001]

$$k_H = \sqrt[3]{\frac{3E^2 N \sqrt{r_n R_{wx}}}{2(1-\nu^2)^2}} \quad (3.10)$$

missä  $E$  = kimmomoduuli  
 $\nu$  = Poisson-luku  
 $N$  = pyöräkuorma  
 $r_n$  = pyörän säde  
 $R_{wx}$  = kiskon kulkupinnan säde

Kaavan 3.10 perusteella laskettu Hertzin jousivakio  $k_H$  pyörä-kisko -kontaktille eri tapauksissa on esitetty taulukossa (Taulukko 3.4).

Taulukko 3.4 Junan pyörän ja kiskon välinen maksimikontaktipaine ja sen laskenta-parametrit Suomessa käytössä olevalle junakalustolle.

Parametri	Mitoituskuormakaavion tunnus				
	LM71-17	LM71-22,5	LM71-25	LM71-30	LM71-35
$Q_{vk}$ [kN]	188	250	275	333	370
$N$ [kN]	94	125	137,5	166,5	185
$r_n$ [mm]	550	550	550	550	550
$R_{wx}$ [mm]	300	300	300	300	300
$R_{rx}$ [mm]	80	80	80	80	80
$A$ [1/mm]	0,00091	0,00091	0,00091	0,00091	0,00091
$B$ [1/mm]	0,0079	0,0079	0,0079	0,0079	0,0079
$\theta$ [°]	37,49	37,49	37,49	37,49	37,49
$m$	2,285	2,285	2,285	2,285	2,285
$n$	0,549	0,549	0,549	0,549	0,549
$r$	0,795	0,795	0,795	0,795	0,795
$E$ [GPa]	207	207	207	207	207
$v$	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
$a$ [mm]	9,4	10,4	10,7	11,4	11,8
$b$ [mm]	2,3	2,5	2,6	2,7	2,8
$\delta$ [mm]	0,12	0,14	0,15	0,17	0,19
$\sigma_{max}$ [MPa]	2103	2312	2387	2544	2635
$k_H$ [GN/m]	1,44	1,58	1,63	1,74	1,80

Popov et al. [2002] ehdottaa numeerista arviointimenetelmää kitkakertoimen määrittämiseksi materiaali- ja kuormitusparametrien funktiona. Koska kitkakerroin on dimensioton, se voi riippua ainoastaan dimensiottomista systeemiparametrien yhdistelmistä. Tämän seurauksena yleisessä tapauksessa kitkakerroin voidaan ajatella olevan kolmen toisistaan riippumattoman parametriyhdistelmän funktio. Parametrit ovat kimmomoduuli  $E$ , vetolujuus  $\sigma_0$ , kiskon/pyörän tiheys  $\rho$ , nopeus  $v$  ja kontaktipaine  $P$ . Empiiriset testit osoittavat, että parametriyhdistelmiä tarvitaan itse asiassa vain kaksi, jotta saavutetaan 3,5 %:n tarkkuus. Kitkakerroin on siis mahdollistaa esittää näiden kahden dimensiottoman parametrin funktiona: [Popov et al. 2002]

$$K_1 = \frac{\rho v^2 E}{\sigma_0^2} \quad (3.11)$$

$$K_2 = \frac{PE}{\sigma_0^2} \quad (3.12)$$

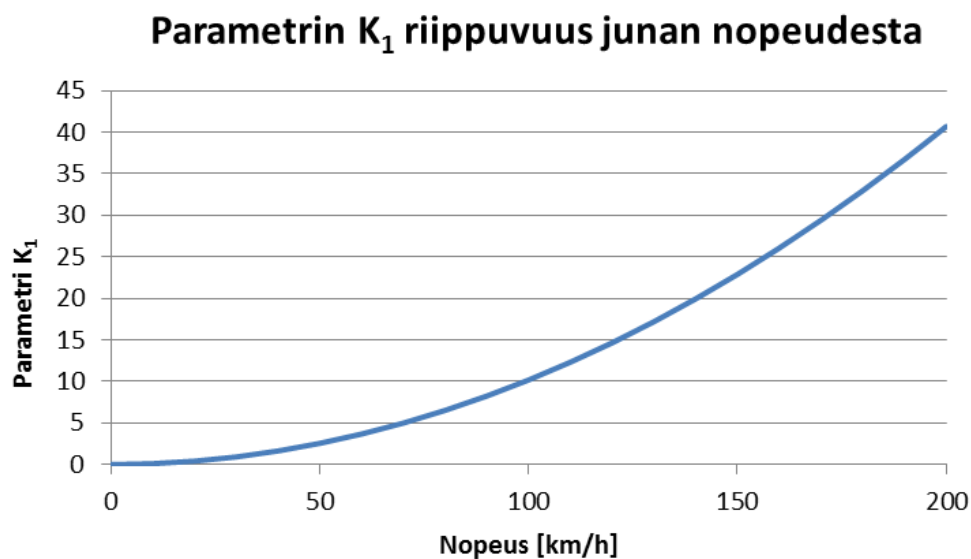
Popov et al. suoritti kymmenen numeerista testisarjaa, joissa vaihdeltiin parametrien  $E$ ,  $\sigma_0$ ,  $\rho$ ,  $v$ ,  $P$  ja  $\eta$  (viskositeetti) arvoja. Tulosten tilastollinen hajonta oli 3,4 %, mikä tukee hypoteesia, että kitkakerroin on riippuvainen ainoastaan parametreista  $K_1$  ja  $K_2$ . Numeerisen tiedon perusteella kitkakertoimen kaavaksi saadaan: [Popov et al. 2002]

$$\mu = \mu_0 + \mu_1 \frac{K_1}{1+bK_1} + \mu_2 \frac{1}{1+cK_2} \quad (3.13)$$

missä numeeristen parametrien arvot ovat: [Popov et al. 2002]

$$\begin{aligned} \mu_0 &= 0,15 \\ \mu_1 &= 0,0442 \\ \mu_2 &= 0,3243 \\ b &= 0,195 \\ c &= 0,00212 \end{aligned}$$

Oletetaan kiskolle vetolujuus  $\sigma_0 = 350$  MPa [Yan & Fischer 2000], kun Popov et al. esittää sille vain laajan vaihteluvälin 92...552 MPa. Kontaktipaine  $P$  on aikaisemmassa taulukossa (Taulukko 3.4) mitoituskuormakaaviolle LM71-35 määritetty maksimikontaktipaine  $\sigma_{\max} = 2635$  MPa. Teräksen kimmomoduuli  $E$  on 207 GPa ja tiheys  $\rho$  on 7800 kg/m<sup>3</sup>. Näin ollen sekä parametri  $K_1$  (Kuva 3.8) että kaavan 3.13 mukainen kitakerroin (Kuva 3.9 ja Taulukko 3.5) riippuvat ainoastaan junan nopeudesta. Junan pyörän ja kiskon väliseksi liukukitkakertoimen vaihteluväliksi saadaan tässä kappaleessa esitetyillä kaavoilla laskemalla 0,15...0,39.



Kuva 3.8 Popov et al.:ssa [2002] esiintyvän pyörän ja kiskon välisen liukukitkakertoimen yhtälössä esiintyvän parametrin  $K_1$  riippuvuus junan nopeudesta LM71-35-akselikuormituksella.

Tutkitaan tämän laskennallisen arvon realistisuutta. Rautatiesuunnittelun perusteos *Modern Railway Track* [Esveld 2001] määrittelee teräspyörän ja -kiskon väliseksi kitkakertoimeksi (adheesiokertoimeksi) kuivalla kiskolla 0,25 ja märällä kiskolla 0,1. Cruceanu [2012] ilmoittaa pyörän ja jarrupalan väliseksi kitkakertoimeksi noin 0,35. Yleisesti kirjallisuuslähteet eivät anna yksiselitteistä staattista tai dynaamista kitakerrointa kuivalle teräs-teräs-kontaktipinnalle, vaan ne vaihtelevat välillä 0,15...0,8. Suuri vaihtelevuus johtuu kontaktipaineesta, pintakarheudesta, lämpötilasta, liukumisnopeudesta ja mahdollisista pinnan epäpuhtauksista. Tämän takia kahden materiaalin välinen kitakerroin on altis muutoksille, kun materiaalit liukuvat suhteessa toisiinsa.

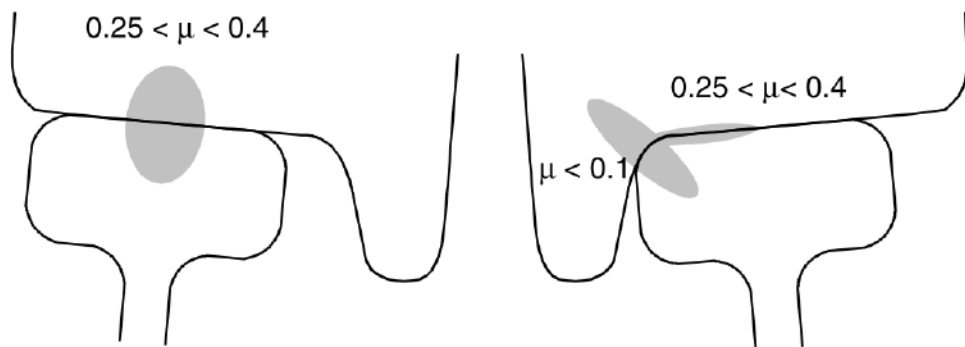




(tribometer)

•  
•

(Kuva 3.10)



Kuva 3.10 Pyörä-kisko -kontaktin ideaalikitkakertoimia [Sinclair 2004].

•  
•  
•

*Kuva 4.1*



Kuva 4.1 Suomen rataverkolla sallitut akselipainot 31.12.2010 [Liikennevirasto 2010b].

$$Q_{\text{tot}} = (Q_{\text{stat}} + Q_{\text{centr}} + Q_{\text{wind}}) + Q_{\text{dyn}} \quad (4.1)$$

missä

$Q_{\text{tot}}$	kokonaispystykuorma
$Q_{\text{stat}}$	staattinen pystysuuntainen kuorma
$Q_{\text{centr}}$	kuorman pystysuuntainen lisäys kaarteessa
$Q_{\text{wind}}$	sivutuulen aiheuttama pystykomponentti
$Q_{\text{dyn}}$	dynaaminen pystysuuntainen kuorma

Kvasistaattiset kuormat aiheutuvat liikkuvan kaluston painosta (kaava 4.2), sivutuulesta ja keskipakovoimista (kaava 4.3). Keskipakovoiman suuruuteen vaikuttaa kallistuksen vajoaus  $h_d$  (kaava 4.4), joka edustaa raiteen todellisen kallistuksen ja tasapainokallistuksen eroa. [Esveld 2001], [Liikennevirasto 2010a]

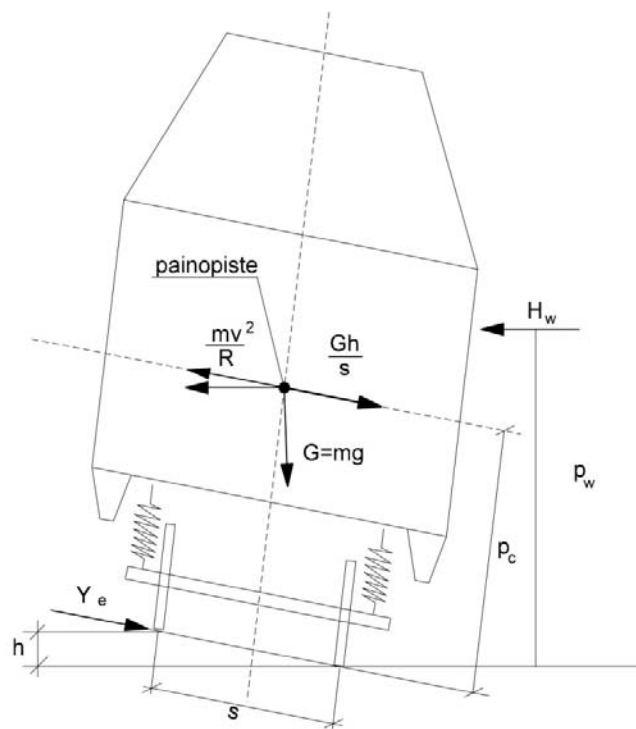
$$Q_{\text{stat}} = \frac{G}{2} \quad (4.2)$$

$$Q_{\text{centr}} + Q_{\text{wind}} = G \frac{p_c h_d}{s^2} + H_w \frac{p_w}{s} \quad (4.3)$$

$$h_d = \frac{sv^2}{gR} - h \quad (4.4)$$

missä

$G$	akselikuorma
$p_c$	kaluston painopisteen etäisyys
$h_d$	kallistuksen vajoaus
$s$	raiteen leveys
$H_w$	sivutuulesta aiheutuva voima
$p_w$	sivutuulen voimaresultantin etäisyys
$v$	nopeus
$g$	putoamiskiihtyvyys
$R$	kaaren säde
$h$	raiteen kallistus



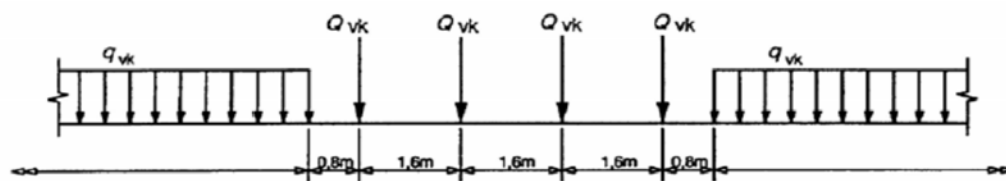
Kuva 4.2 Kvasistaattiset voimat kaarteessa [Vinter 2015].

(dynamic amplification factor, DAF)

- 
- 
- 
- 
-

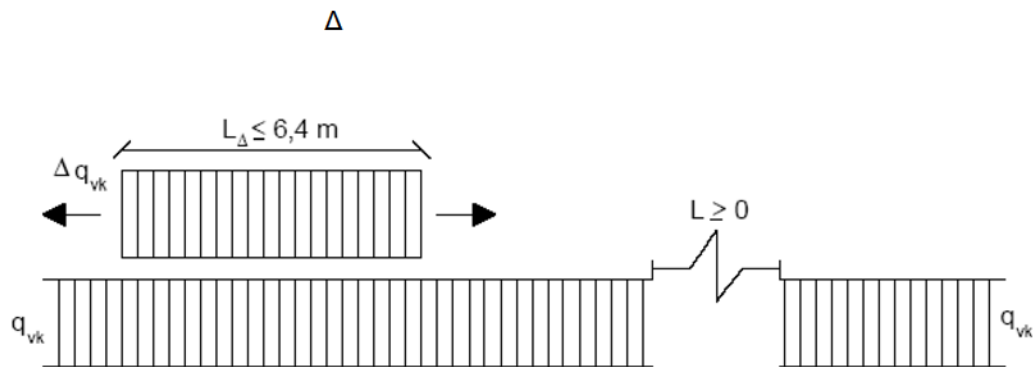
(Kuva 4.3)

(Taulukko 4.1)



Kuva 4.3 SFS-EN1991-2 mukainen kuormakaavio LM71 [Liikennevirasto 2014b].

(Kuva 4.4)



Kuva 4.4 Kuormakaavion LM71 käsittely kahtena tasaisena kuormana [Liikennevirasto 2014b].

*Taulukko 4.1 Kuormakaavion LM71 mitoitusakselipainot, niiden tunnuksset sekä vastaavat staattiset nauhakuormien ja akselikuormien arvot [Liikennevirasto 2014b].*

Kaluston sallittu akselipaino [kN]	Mitoituskuormakaavion tunnus	Mitoituskuormakaavion nauhakuorma, $q_{vk}$ [kN/m]	$\Delta q_{vk}$ [kN/m]	Mitoituskuormakaavion akselikuormat, $Q_{vk}$ [kN]
170	LM71-17	60	58	188
225	LM71-22,5	80	76	250
250	LM71-25	88	84	275
300	LM71-30	106	102	333
350	LM71-35	120	111	370

*(Taulukko 4.2)*

Taulukko 4.2 SFS-EN 15528:n mukaiset kuormakaaviot ja mitoitusakselipainot  
[Liikennevirasto 2014b].

Referenssi vaunu	Akselikuorma P (t)	Metripaino p (t/m)	Mitat
C2	20	6,4	
C3	20	7,2	
C4	20	8,0	
D2	22,5	6,4	
D3	22,5	7,2	
D4	22,5	8,0	
xL-a	20	8,0	
xL-b	22,5	7,4	
E4	25	8,0	
E5	25	8,8	



#### 4.2.2 Sysäys

Junakuorman dynaaminen sysäyskerroin kuvaa liikkuvan junan sysäysten aiheuttamia pystysuoran ominaiskuorman lisäyksiä. Sysäysten vaikutus kuormakaavioihin saadaan kertomalla kuormakaavio dynaamisella sysäyskerroimella. [Liikennevirasto 2014a]

Uusien ratojen suunnittelussa sysäyskerroimelle käytetään RATO 3:ssa arvoa  $\varphi_v = 1,25$  [Liikennevirasto 2014b]. *Paalulaattojen ja paaluhatturakenteiden suunnittelu* -ohjeessa käytetään myös dynaamisena lisänä arvoa 1,67, kun pengerkorkeus on 1,4 m [Liikennevirasto 2014c]. Vanhojen ratojen suunnittelussa sysäyskerroimelle  $\varphi_v$  käytetään liikennöintinopeudesta ja radan kunnossapitotasosta riippuvaa arvoa. Sysäyskerroin lasketaan kaavojen 4.5 ja 4.6 sekä taulukon (*Taulukko 4.3*) mukaan. [Liikennevirasto 2014b]

$$\varphi_v = 1 + n \left( 1 + 0,5 \frac{V-60}{K_i} \right), \text{ kun } V > 60 \text{ km/h} \quad (4.5)$$

$$\varphi_v = 1 + n, \text{ kun } V \leq 60 \text{ km/h} \quad (4.6)$$

missä

$n$  = rataosan kunnossapitotasosta riippuva kerroin  
 $V$  = kyseessä olevan junatyypin liikennöintinopeus rataosalla  
 $K_i = 80$  tavarajunilla ja  $K_i = 190$  matkustajajunilla

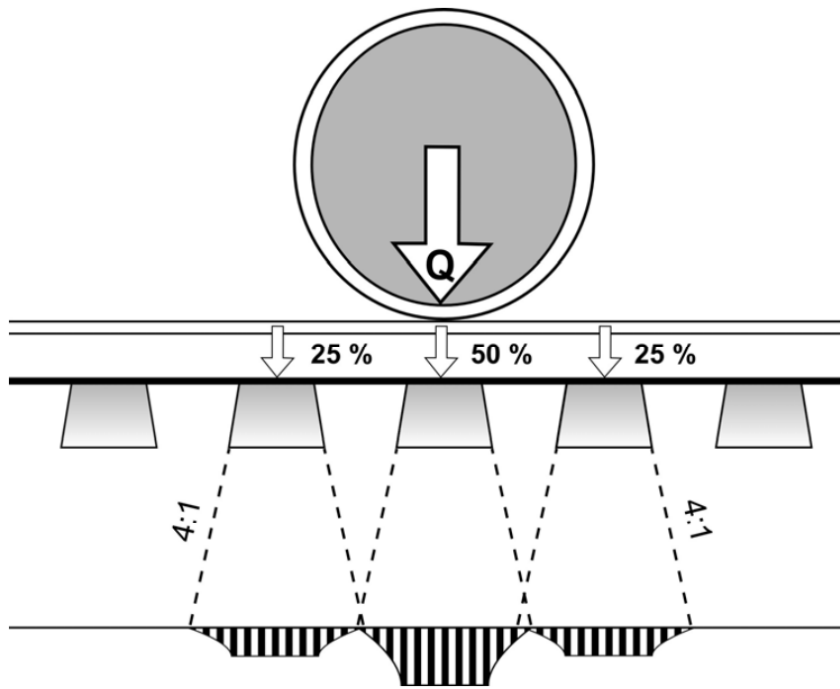
Pohjarakennustyömaan kohdalla kertoimelle  $n$  käytetään aina arvoa  $n = 0,25$ . Maanvaraisen penkereen stabiliteetin osalta mitoittava tilanne on pysähtynyt juna, jolloin sysäyskerroimen arvo on 1,0. [Liikennevirasto 2014b]

*Taulukko 4.3 Rataosan kuntoluokka, kunnossapitotaso ja  $n$ -kerroin [Liikennevirasto 2014b].*

Rataosan kuntoluokka	Kunnossapitotaso	Kerroin $n$
Korkea kunnossapitotaso	1A, 1AA	0,15
Normaali kunnossapitotaso	1 - 4	0,20
Alhainen kunnossapitotaso	5 - 6	0,25

#### 4.2.3 Pystysuorien kuormien jakaantuminen

RATO 3:n [Liikennevirasto 2014b] mukaan pystysuoran junakuorman jakaantuminen ratapölkkyjen kautta ratapenkereeseen voidaan olettaa alla olevan kuvan (*Kuva 4.5*) mukaiseksi. Tukikerroksessa kuorman voidaan olettaa jakaantuvan 4:1 kaltevuudessa ja muissa maakerroksissa 2:1 kaltevuudessa.



Kuva 4.5 Pystysuoran junakuorman jakaantuminen ratapölkkyistä ratapenkereeseen. Ratapölkyn pituussuunnassa kuormitus kohdistuu molempiin päihin, runsaalle ratapölkyn kolmasosalle. [Liikennevirasto 2014b]

## 4.3 Vaakakuormat

### 4.3.1 Määritelmä

Rataan vaikuttavat vaakakuormat ovat joko poikkisuuntaisia tai pituussuuntaisia. Poikkisuuntaiset kuormitukset ovat huomattavasti monimutkaisempia kuin pystysuuntaiset kuormitukset, joten niitä ymmärretään vähemmän kuin pystysuuntaisia kuormituksia [Indraratna et al. 2011]. Poikkisuuntaisia vaakavoimia aiheuttavat pääasiassa sivuttainen pyöräkuorma ja kiskoon nurjahdusta aiheuttava voima. Sivuttainen pyöräkuorma aiheutuu pyörän ja kiskon välisestä kitkavoimasta sekä pyörän laipan aiheuttamasta sivuttaisvoimasta. Periaatteessa ratarakenteeseen kohdistuvat poikkisuuntaiset vaakavoimat voidaan määritellä pystysuuntaisia voimia vastaavalla yhtälöllä, jossa suluissa olevat termit kuvaavat kvasistaattista kuormituksen osaa [Selig & Waters 1994], [Esveld 2001]:

$$Y_{\text{tot}} = (Y_{\text{flange}} + Y_{\text{centr}} + Y_{\text{wind}}) + Y_{\text{dyn}} \quad (4.7)$$

$$Y_{\text{e,max}} \approx G \frac{h_d}{s} + H_w \quad (4.8)$$

missä

$Y_{\text{tot}}$	kokonaisvaakakuorma
$Y_{\text{flange}}$	pyörän laipan aiheuttama poikkisuuntainen voima kaarteessa
$Y_{\text{centr}}$	poikkisuuntainen kuorman lisäys kaarteessa
$Y_{\text{wind}}$	sivutuulen aiheuttama vaakakomponentti
$Y_{\text{dyn}}$	dynaaminen poikkisuuntainen kuorma
$Y_{\text{e,max}}$	yhteen akseliin kohdistuvat poikkisuuntaiset voimat

•  
•  
•  
•

•  
•  
•  
•  
•  
•  
•  
•  
•

*(Kappale 1)*

$$F_k = \mu F_n \quad (4.9)$$

missä

$F_k$  = kitkavoima,

$\mu$  = kitkakerroin,

$F_n$  = pinnan normaalivoima.

Käytännössä suunnitteluohjeet tulkitsevat, että  $F_k$  on jarrutusvoima,  $\mu$  on pyörän ja kiskon välinen liukukitkakerroin ja  $F_n$  on junan akselipaino. Ohjeet ovat lähes yksinomaan ratasilloille, mutta ohjeita voi soveltaa, koska sillan kansi ja pengerlaatta sekä niiden yläpuoliset radan rakennekerrokset ovat tarpeeksi vertailukelpoisia keskenään. Kaikki ohjeet olettavat jarrutuskuorman välittyvän täydellisesti radan rakenteiden läpi kiskojen tasosta sillan kannelle tai pengerlaatalle.

*Ratatekniset määräykset ja ohjeet (RAMO), Osa 11, Radan päällysrakenne* [Ratahallintokeskus 2002] ohjeistaa, että jarrutusvoima on tasaisella radalla noin 25 % staattisesta painosta eli enintään noin 20 kN/m. Suurin sallittu pystysuuntainen staattinen metripaino on 80 kN/m [Ratahallintokeskus 1995]. Tämä ohje siis käyttää Coulomb-kitkan kaavaa 4.9 sillä oletuksella, että kitkakerroin  $\mu$  on 0,25. Voima kohdistuu oletettavasti kiskoihin, vaikka tätä ohje ei yksinomaan tarkenna.

Seuraavana vuonna julkaistu *Oikorata Kerava-Lahti paalulaattojen suunnittelu- ja rakentamisohje* [Ratahallintokeskus 2003] ottaa huomioon jarrutusvoiman pituussuuntaisena lisäkuormana jarruttaessa ja kiihdyttäessä. Yhdeltä raiteelta oletetaan kehittyvän vaakakuormaa 28 % pystysuorasta junakuormasta. Tämä voima kohdistuu paalulaattaan. Kitkakertoimeksi  $\mu$  oletetaan siis 0,28 kaavassa 4.9. Perusteluja tälle arvolle ei ole esitetty. Lisäksi todetaan, että toisen raiteen vaikutuksesta otetaan huomioon 60 %. Ohjeessa lasketaan jarrukuorma pystysuoralle nauhakuormalle 106 kN/m, joka vastaa mitoituskuormakaavion LM71-30 nauhakuormaa (*Taulukko 4.1*). Kaluston sallittu akselipaino on tässä tapauksessa 300 kN.

*Paalulaattarakenteiden suunnittelu* [Kujala 2005] viittaa Oikoradan tyyppiratkaisuun ja tarkentaa sitä jarrutusvoiman osalta. Junakuorman pituussuuntainen lisäkuorma eli jarrutusvoima lasketaan prosentteina paalulaattaa kuormittavasta pystysuorasta junakuormasta alla olevan taulukon mukaisesti (*Taulukko 4.4*).

Taulukosta saatavaa pituussuuntaista lisäkuormaa voidaan käyttää paalulaattarakenteita suunniteltaessa. Kyseisessä taulukossa on sillan pituutta merkitty kirjaimella L (m) ja sen arvoksi otetaan sillan kannen pituus [Kujala 2005]. Lopputuloksena on sama kitkakertoimen  $\mu$  arvo 0,28 kuin Oikoradan tyyppiratkaisun tapauksessa.

Taulukko 4.4 Junakuorman pituussuuntainen lisäkuorma prosentteina sillan pystysuorasta junakuormasta [Kujala 2005].

I	Sillalla on pysyvästi jatkuvaksi hitsattu raide, joka ulottuu sillan päiden ohitse riittävän pitkän matkan (50 m)	$28 - \frac{1180}{L + 14} \geq 15\%$
II	a) Sillalla on pysyvästi jatkuvaksi hitsattu raide, joka ulottuu sillan toisen pään ohitse riittävän pitkän matkan (50 m) ja sillan toisessa päässä on kiskonliikuntalaite. b) Sillalla on normaalein kiskoatkoksien jatkettu kiskotus ns. lyhytkiskoraide.	$28 - \frac{590}{L + 14} \geq 15\%$
III	Sillalla on molemmissa päissä kiskonliikuntalaite	28%

Ohjeen *Paalulaattarakenteiden suunnittelu* tarkennukset perustuvat ohjeeseen *Rautatiesiltojen suunnitteluohje, Osa 2, Rautatiesiltojen kuormat* [Ratahallintokeskus 2002], joka ei enää ole käytössä. Todennäköisesti myös Oikoradan tyyppiratkaisun jarrutusvoimayhtälö perustuu samaiseen julkaisuun. Molemmat ohjeet siis olettavat jarrutuskuorman olevan pengerlaatalla sama kuin sillan kannella yllä olevan taulukon (Taulukko 4.4) mukaisesti ja vaakakuorman välittyvän radan rakenteiden läpi täydellisesti.

*Eurokoodin soveltamisohje, Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet – NCCI 1* [Liikennevirasto 2011b] antaa jarrutusvoimalle laskennallisen kaavan ja sille soveltamisohjeita. Ohjeen mukaan veto- ja jarrutuskuormat vaikuttavat kiskon selän korkeudella ja kuvaavat liikkuvan kaluston aiheuttamia pituussuuntaisia ominaiskuormia yhtälöiden 4.10 ja 4.11 mukaisesti.

Ominaisvetokuorma:

$$Q_{lak} = 33 \left[ \frac{\text{kN}}{\text{m}} \right] \times L_{a,b} [\text{m}] \leq 1000 \text{ kN} \quad (4.10)$$

Ominaisjarrutuskuorma:

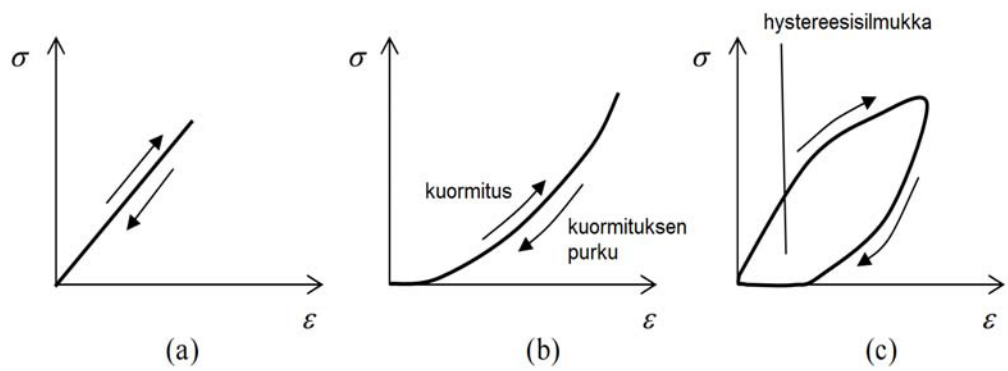
$$Q_{lbk} = 20 \left[ \frac{\text{kN}}{\text{m}} \right] \times L_{a,b} [\text{m}] \leq 6000 \text{ kN} \quad (4.11)$$

joissa  $L_{a,b}$  on veto- ja jarrutuskuormien tarkasteltavan rakenneosan tarkastelupituus, jolla veto- tai jarrutuskuorman oletetaan vaikuttavan tasaisesti jakautuneena. NCCI1 ehdottaa näihin yhtälöihin korotus- ja vähennyskertoimia eri tarkasteluperustein. Ohje myös ilmoittaa, että erikoisliikennettä (esim. henkilöliikennematkat) välittävillä radoilla veto- ja jarrutuskuormina voidaan käyttää vaihtoehtoisesti tuttua 25 %:a staattisten akselikuormien summasta, kunhan ei ylitetä kaavojen 4.10 ja 4.11 viittaamia maksimiarvoja.

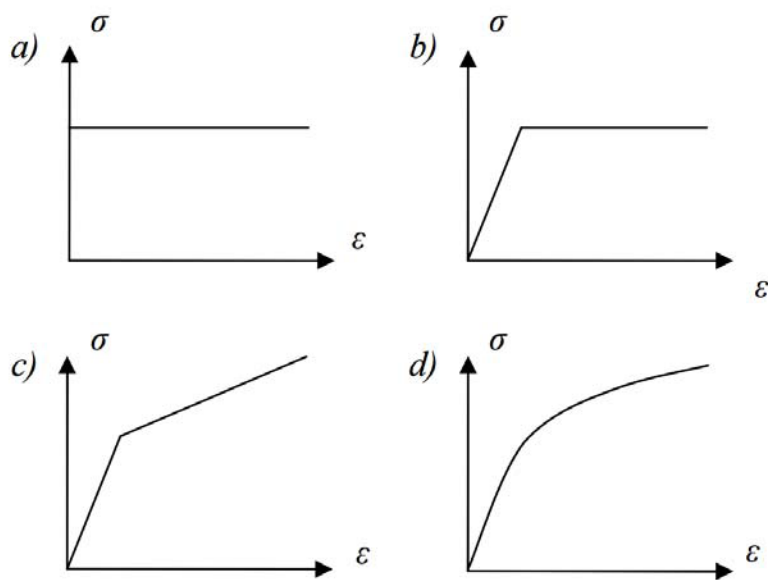
Liikenneviraston [2014c] ohjeen *Paalulaattojen ja paaluhatturakenteiden suunnitteluohje* mukaan noudatetaan NCCI1:tä. Paalulaattojen mitoituksessa on lisäksi otettava huomioon keskipakoisvoimasta ja sivusuuntaisesta sysäyksestä aiheutuvat voimat. Jarrukuormaa ja sivusysäyskuormaa laskettaessa laskentapituutena käytetään liikuntasaumoin erotetun laatan osan pituutta. [Liikennevirasto 2014c]

*Ratatekniset ohjeet (RATO), Osa 3, Radan rakenne*

Kuva 5.1



Kuva 5.1 Erilaisia jännitys-muodonmuutos -suhteita: (a) lineaarisesti elastinen, (b) epälineaarisesti elastinen, (c) viskoelastinen / plastinen / viskoplastinen [muokattu Piaras 2013].



Kuva 5.2 Elasto-plastisia jännitysvenymäkäyriä: (a) täydellisen plastinen, (b) ideaalinen elastoplastinen, (c) lineaarisesti lujittuva, (d) epälineaarisesti lujittuva [Kivivuori 1996], [Vanamo 2007].

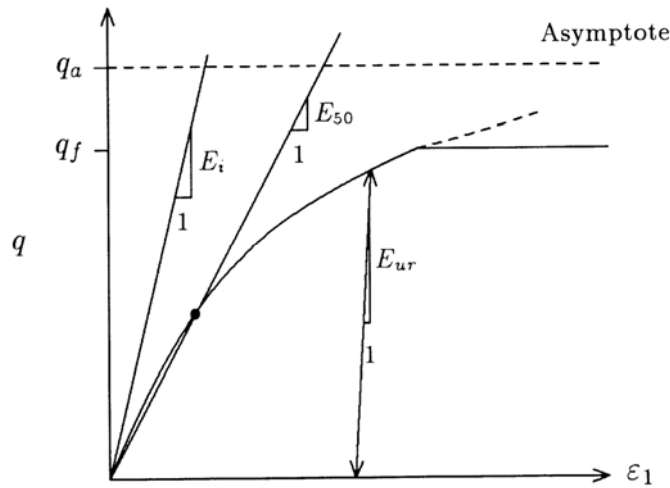


ε

(Kaava 5.1)

(Kuva 5.3)

(Kaava 5.2)



Kuva 5.3 Hyperbolinen jännitys-muodonmuutos-suhde primäärisessä kolmiaksisiaalikuormituksessa, mihin HS-malli ja jäykkyysparametrien määrittäminen perustuvat [Schanz et al. 1999].

$$q_a = \frac{q_f}{R_f} \quad (5.1)$$

$$q_f = \frac{6 \sin \varphi_p}{3 - \sin \varphi_p} (p + c \cot \varphi_p) \quad (5.2)$$

missä

$q_a$	pystysuuntaisen muodonmuutoksen ja deviatorisen jännityksen suhde
$q_f$	suurin deviatorinen jännitys
$\varphi_p$	kitkakulma
$p$	sellipaine
$c$	koheesio
$R_f$	murtotilan jännityssuhde, käytetään yleensä arvoa 0,9

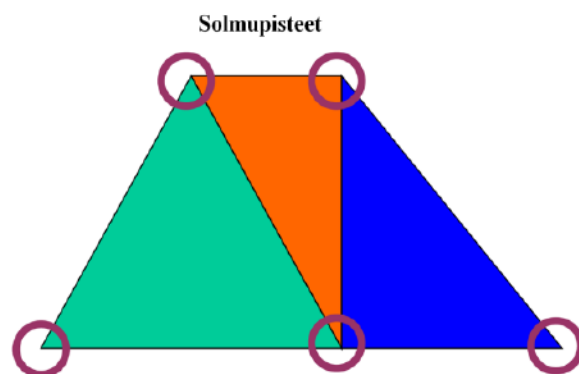
Jännitystiloja kuvaillaan Mohr-Coulomb-mallin tavoin kitkakulmalla  $\varphi$  [°], koheesiolla  $c$  [kN/m²] ja dilataatiokulmalla  $\psi$  [°]. Maan jäykkyys sen sijaan kuvaillaan huomattavasti tarkemmin käyttämällä kolmea eri jäykkyysparametria  $E_{50}$ ,  $E_{ur}$ ,  $E_{oed}$  yhden kimmomoduulin sijaan. Malli kuvaa näin jäykkyyden ja jännitystilan riippuvuutta. Parametrit  $E_{50}$  ja  $E_{ur}$  määritetään avoimen kolmiaksisiaalikokeen tuloksista ja  $E_{oed}$  määritetään ödometrikokeen primäärikuormitusvaiheesta tangenttimoduulina. Edellämainittujen parametrien lisäksi HS-mallissa tarvitaan ns. edistyneitä parametreja, joiden arvoiksi suositellaan oletusasetuksia, kun kohdekohtaista tutkimustietoa näistä parametreista ei ole tarjolla. [Brinkgreve et al. 2012b]

Vaikka HS-mallia voidaan pitää kehittyneenä maan materiaaalimallina, malli ei ota huomioon useita tekijöitä oikean maan käyttäytymisessä. Se on maan lujittumista tutkiva malli, joka ei huomioi maan dilataation ja koheesivoimien vaikutuksista johtuvaa maan pehmenemistä. HS-malli on tosiasiaa isotrooppinen lujittumismalli, joka ei mallinna hystereesistä tai syklistä muodonmuutostähtäytymistä. Ennen kaikkea HS-malli ei kykene erottelamaan muodonmuutosten vaikutusta jäykkyyteen, sillä pienillä muodonmuutoksilla jäykkyys kasvaa ja muodonmuutosten kasvaessa jäykkyys pienenee. Tämän takia käyttäjän tulee valita sopiva jäykkyyssarvo mallinnettavan kohteen perusteella. [Brinkgreve et al. 2012b]

(Finite Element Method, FEM)  
hod, FDM)

(Finite Difference Met-

Kuva 6.1



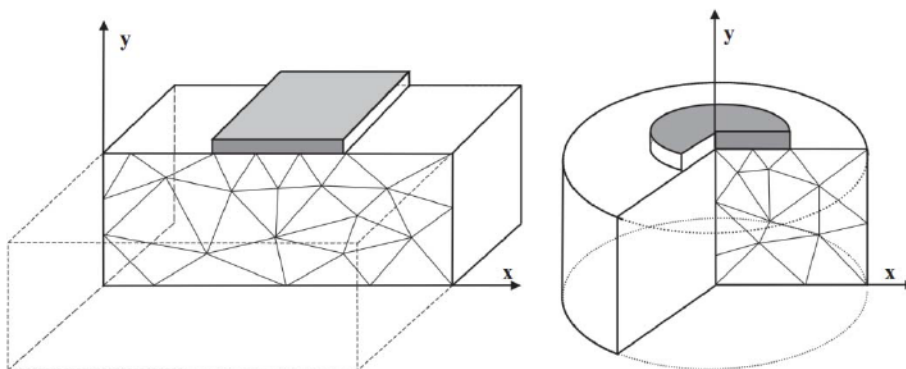
Kuva 6.1 Rakennemallin diskretisoiminen elementeiksi ja elementtien väliset solmupisteet.

plane strain axisymmetric Kuva 6.2

Plane strain -

Axisymmetric

Plane strain



Kuva 6.2 Esimerkki Plane strain- (vasen) ja Axisymmetric-tarkasteluista (oikea) [Brinkgrieve et al. 2012a].

(Kappale 5)

\_\_\_\_\_ (Plate)

*Plate*

*Plate*

\_\_\_\_\_ (Interface)

*Interface*

*(plate element)*

*(volume element)*

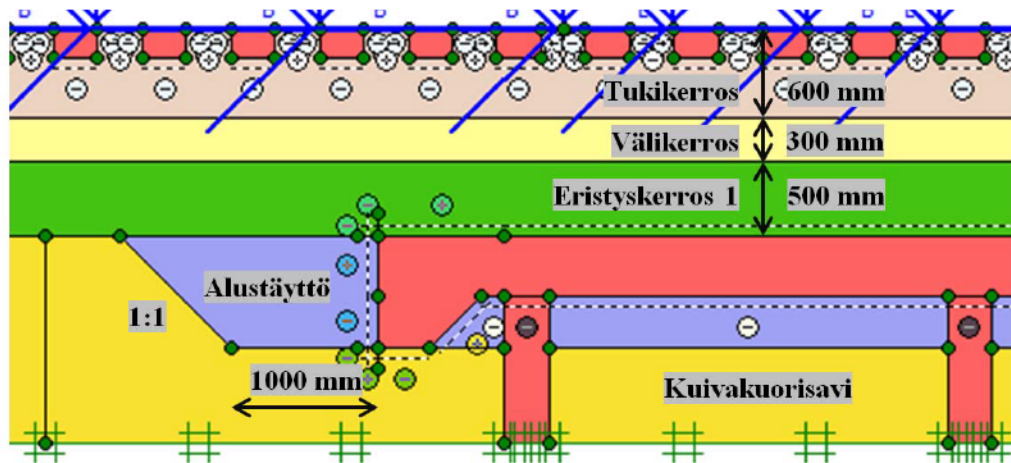
*Kuva 6.3, Kuva 6.4, Kuva 6.5 ja Kuva 6.6*

*metria (Kuva 6.3, Kuva 6.4, Kuva 6.4)*

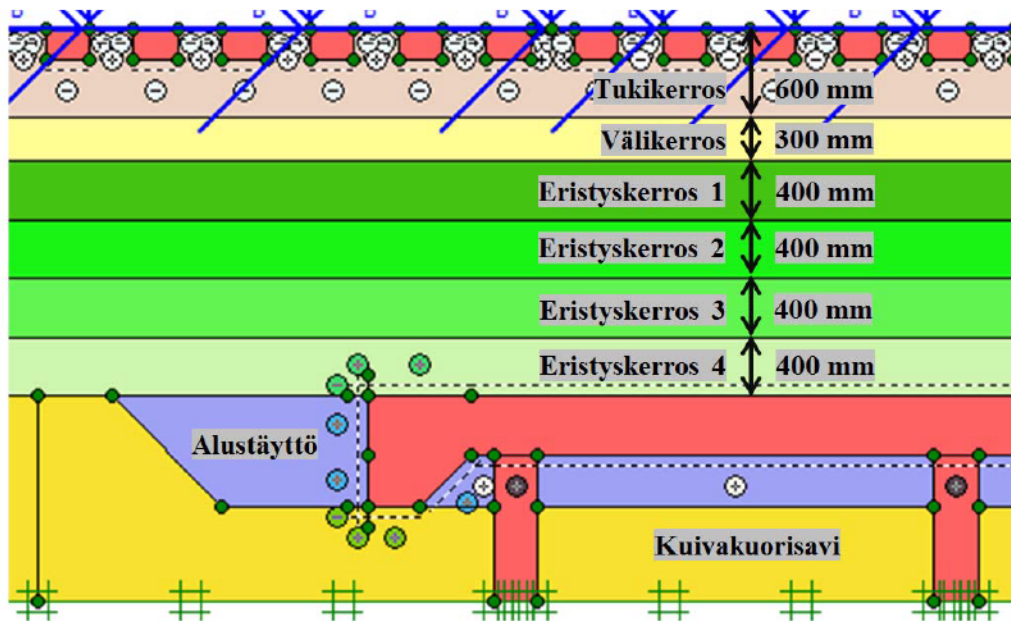
*uuden radan geo-*

*(Kuva 6.6)*

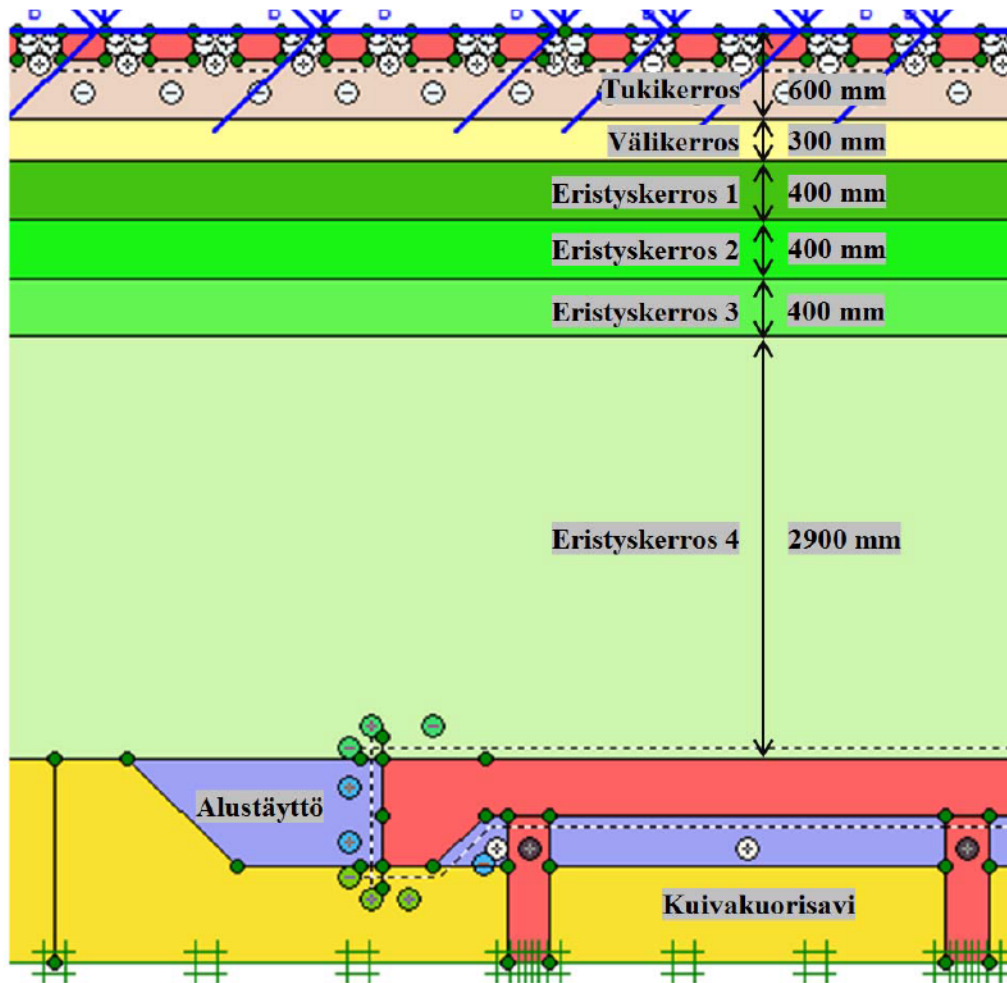
*vanhan radan geometria*



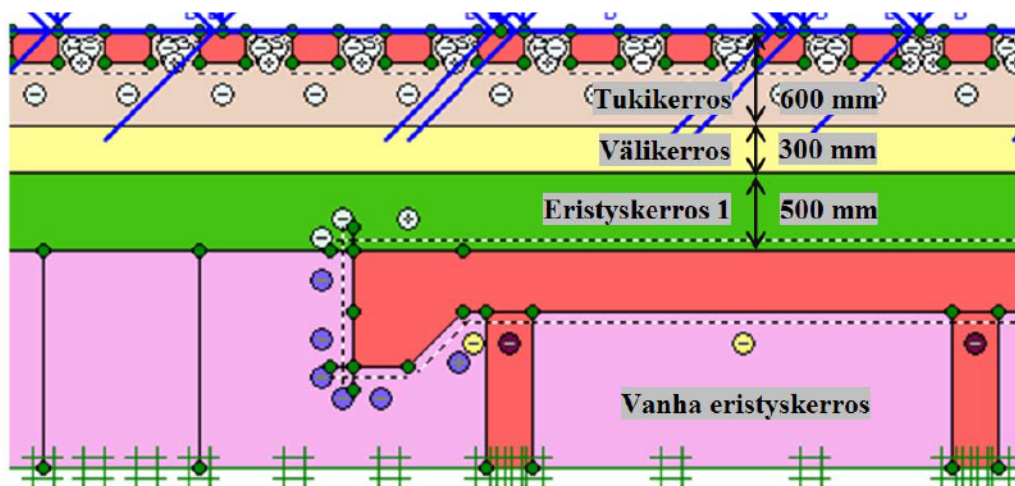
Kuva 6.3 1,4 m korkean ratapenkereen rakennekerrokset. Uuden radan geometria.



Kuva 6.4 2,5 m korkean ratapenkereen rakennekerrokset. Uuden radan geometria.



Kuva 6.5 5,0 m korkean ratapenkereen rakennekerrokset. Uuden radan geometria.



Kuva 6.6 1,4 m korkean ratapenkereen rakennekerrokset. Vanhan radan geometria.



(Kappale 5.3.3 )

(Taulukko 6.1)

Taulukko 6.1 Maarakennekerrosten Hardening Soil (HS) -malliparametrit työn rakennemallissa.

	[kN/m <sup>3</sup> ]	[kN/m <sup>3</sup> ]	[kN/m <sup>2</sup> ]	[kN/m <sup>2</sup> ]	[kN/m <sup>2</sup> ]	[kN/m <sup>2</sup> ]	[°]	[°]

geometrian

Vanhan radan

(Taulukko 6.2)  
(Taulukko 6.3)  
(Kappale 6.5.2 )

Taulukko 6.2 Betonin (ratapölkylä, pengerlaatta, paalut) lineaarisesti elastiset malliparametrit työn rakennemallissa.

Rakenne	$\gamma_{\text{unsat}} [kN/m^3]$	$E [GPa]$	$\nu [nu]$
Betoni	25.0	30	0.20

Taulukko 6.3 Kiskojen elastiset malliparametrit työn rakennemallissa.

Rakenne	$EA_1 [kN/m]$	$EI [kN\ m^2/m]$	$w [kN/m/m]$	$\nu [nu]$
Kiskoteräs	1224000	4865	0.455	0.3

#### 6.4.3 Rajapinnat

Pengerlaatta ei lepää paalujen varassa kitkattomasti rullien päällä, mikä olisi epärealistinen tilanne. Pengerlaatan ja paalujen välille on mallinnettu rajapinta, jonka kitkakerroin ( $\mu_{\text{kumi}} \approx R_{\text{inter,kumi}} = 0,20$ ) [Betonikeskus ry 2008] vastaa synteettistä kumilevyä, neopreniä, joka asennetaan käytännössä paalun ja pengerlaatan välille.

Pengerlaatan alla oleva alustäyttö oletetaan painuvaksi siten, että pengerlaatan ja alustäytön kitkakerroin ( $\mu_{\text{alus}} \approx R_{\text{inter,alus}} = 0,01 \approx 0$ ) arvioidaan olemattomaksi. Pengerlaatan päällä lepäävän eristyskerroksen ja pengerlaatan välisestä kitkakertoimesta ei ole tarkkaa tietoa, joten se oletetaan olevan noin 2/3 ( $\mu_{\text{eristys}} \approx R_{\text{inter,eristys}} = 0,67$ ). Tämä on Plaxis-käyttöoppaan mukaan edustava oletusarvo, kun tarkkaa tietoa ei ole saatavilla [Brinkgreve et al. 2012a].

Leukapalkin ympärillä oleva maa voi käytännössä liikkua vapaasti leukapalkin suhteen, joten lähtökohtana on, että mallinnuksessa kitkakerroin tällä rajapinnalla tulee olla mahdollisimman pieni. Työn aikana suoritettiin Plaxis-ohjelmalla herkkyystarkastelu (*Kappale 6*), jonka perusteella mallinnuksessa käytetään kitkakerrointa  $\mu_{\text{leuka}} \approx R_{\text{inter,leuka}} = 0,40$ .

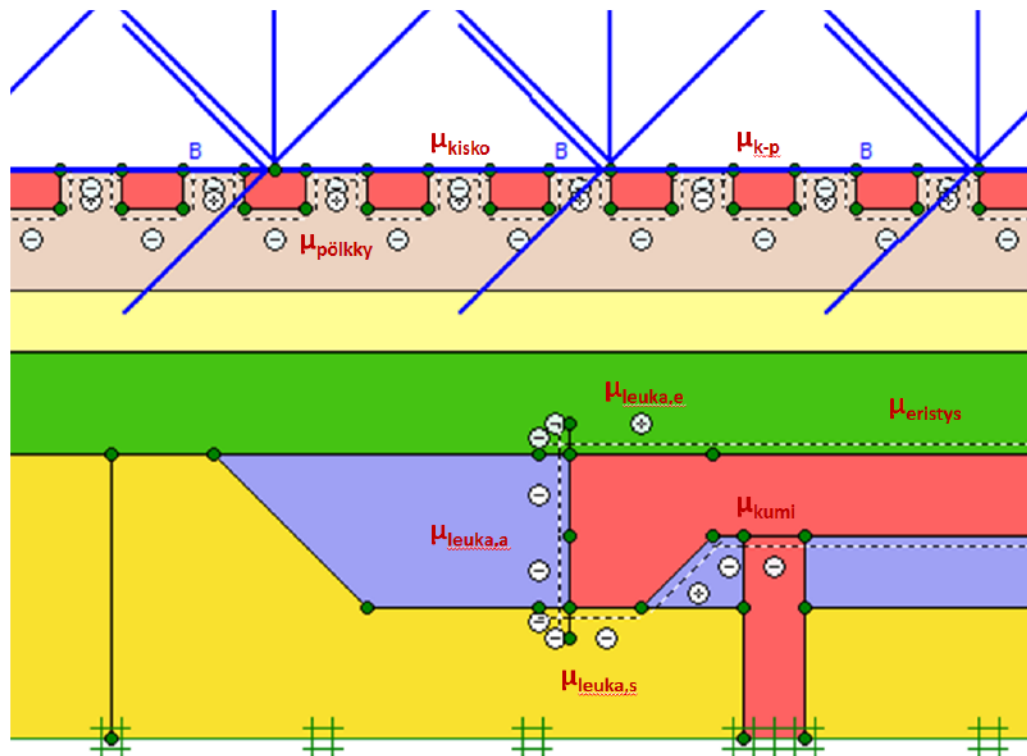
Ratakiskon ja -pölkyn välille ei ole asetettu rajapintaa. Niiden oletetaan olevan täydellisen jäykästi kiinni toisissaan ( $\mu_{\text{k-p}} \approx R_{\text{inter,k-p}} = 1$ ), koska Plaxis-ohjelman materiaalmallit soveltuvat parhaiten maan käyttäytymisen arvioimiseen, ei kahden jäykän materiaalin välisen kontaktin mallintamiseen. Toiseksi mallinnuksessa halutaan tutkia ratarakenteen maakerrosten osuutta voimien välityksessä, joten kiskon ja pölkyn välinen kanssakäyminen on työn laajuuden ulkopuolella. Olettamalla jäykkä kontakti, jossa kaikki kiskon voimat välittyvät pölkyille, saadaan työssä varmalla puolella oleva kokonaistulos.

Ratakisko ja tukikerros eivät käytännössä ole kosketuksissa toisiinsa, joten geometriassa niiden välisellä rajapinnalla kitkakerroin ( $\mu_{\text{kisko}} \approx R_{\text{inter,kisko}} = 0,01 \approx 0$ ) on olematon. Ratapölkyn ja tukikerroksen välisenä kitkakertoimena käytetään arvoa  $\mu_{\text{pölkky}} \approx R_{\text{inter,pölkky}} = 0,73$  [Esveld]. Kaikki geometriamallin rajapinnat on esitetty alla kuvassa (Kuva 6.7) ja malliparametrit tämän kappaleen taulukoissa (Taulukko 6.4 ja Taulukko 6.5).

Taulukko 6.4 Geometriamallin rajapintojen HS-malliparametrit.

	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	[kN/m <sup>2</sup> ]	[kN/m <sup>2</sup> ]	[kN/m <sup>2</sup> ]	[kN/m <sup>2</sup> ]	$\phi$ [°]	$\psi$ [°]	

- (1) Kun penkereen korkeus on 1,4 m – Eristyskerros 1 alimpana.
- (2) Kun penkereen korkeus on 2,5 m ja 5,0 m – Eristyskerros 4 alimpana.
- (3) Kun käytetään uuden radan rakennekerroksia – alustäyttönä murske.
- (4) Kun käytetään vanhan radan rakennekerroksia – alustäyttönä hiekkainen vanha eristyskerros.



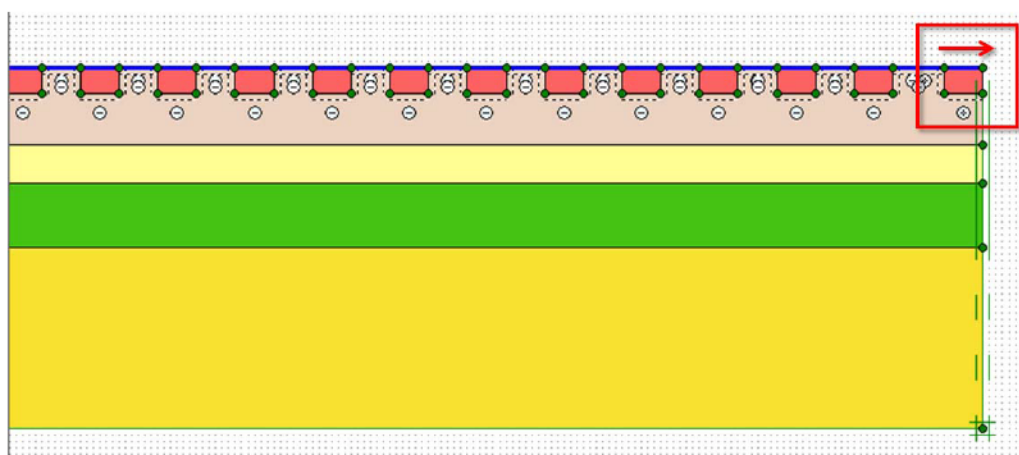
Kuva 6.7. Rajapinnat geometriamallissa. Esimerkkikuvassa on esitetty 1,4 m korkea ratapenger uuden radan rakennekerroksilla.

Taulukko 6.5. Geometriamallin rajapintojen lineaarisesti elastiset malliparametrit.

	$Y_u$			

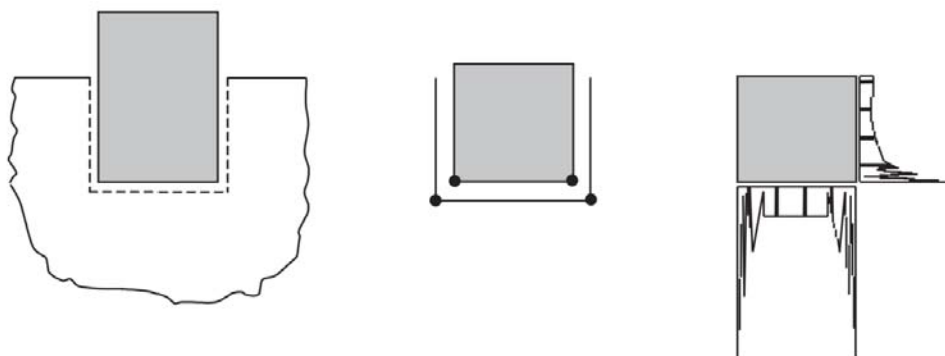
Kuva 6.8

(horizontal / vertical fixities)

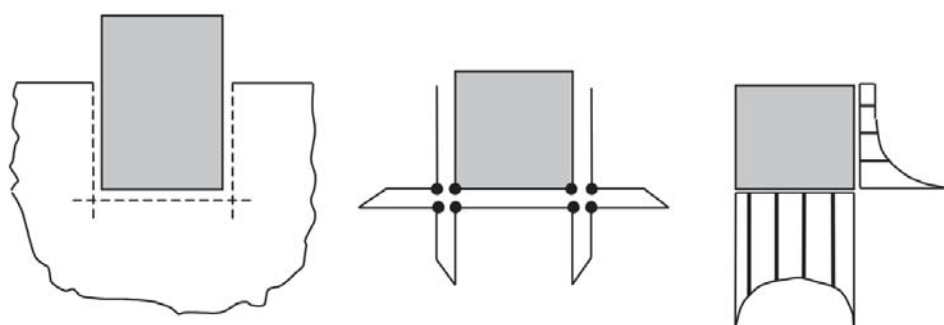


Kuva 6.8 Kisko voi liikkua vapaasti vaakasuunnassa.

(Kuva 6.9 ja Kuva 6.10)



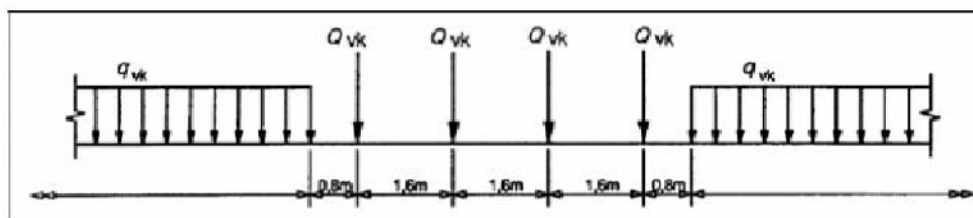
Kuva 6.9 Joustamaton kulmapiste, joka tuottaa huonolaatuisia jännitystuloksia [Brinkgreve et al. 2012a].



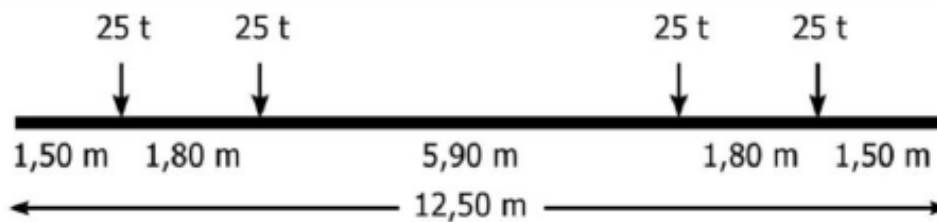
Kuva 6.10 Joustava kulmapiste, joka parantaa jännitystuloksia [Brinkgreve et al. 2012a].

(Kuva 6.7)

(Kuva 6.11)  
(Kuva 6.12)



Kuva 6.11 SFS-EN1991-2 mukainen kuormakaavio LM71 [Liikennevirasto 2014b].



Kuva 6.12 SFS-EN15528 mukainen kuormakaavio E4 [Liikennevirasto 2014b].

Uusien ratojen maanvaraisen perustamisen sekä alus- ja pohjarakenteiden mitoittamiseen sovellettava LM71-kuormakaavio ei edusta tosimaailman kuormitustilannetta. Se on kehitetty alun perin sovittamalla 2D-FEM-mallinnusohjelmaan sopivat kuormitukset jotta referenssinä käytettyjen mallipoikkileikkauksien ratapengerten stabiilitetit vastaavat 3D-FEM-mallinnusohjelman avulla saatuja tuloksia todellisuutta edustavilla junakuormilla. SFS-EN15528 mukaiset kuormakaaviot perustuvat tosimaailman junien painoihin ja mittoihin, jotka on tuotu suoraan sellaisinaan 2D-avaruuteen.

Työssä käytetään viittä erilaista kuormayhdistelmää:

- pistekuormat,
- LM71-35 ilman nauhakuormaa,
- LM71-35 nauhakuorman kanssa,
- SFS-EN15528 E4, ja
- SFS-EN15528 E4 kolmella vaunulla.

Jarrukuormaa rakennemallissa edustavat vaakasuuntaiset pistekuormat, jotka on sijoitettu samoihin vaikutuspisteisiin kuin pystysuuntaiset pistekuormat. Idea on mallintaa tilanne, jossa jarruttava juna välittää sekä juna- että jarrutuskuorman samassa pyörän ja kiskon kontaktpisteessä. Jarrutuskuorma on kitkavoima, joka määräytyy junan pyörän ja kiskon välisen kitkakertoimen ja junakuorman suhteena. Kitkakertoimiksi on valittu 0,25 ja 0,4. Mallinnuksessa käytettävät juna- ja jarrutuskuorma-arvot esitetään seuraavassa kappaleessa (6.5.2).

### 6.5.2 Mitoituskuormien skaalaus

Työssä halutaan tarkastella mahdollisimman painavia junakuormia, joten mitoituskuormiksi valitaan uusille radoille LM71-35 (Taulukko 6.6) ja vanhoille radoille SFS-EN15528 mukainen E4 (Kuva 6.12). Kuormituksen lähtökohdaksi otetaan siis:

$$Q_{vk,LM71-35} = 370 \text{ kN (pistekuormat)}$$

$$q_{vk,LM71-35} = 120 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \text{ (nauhakuormat)}$$

$$Q_{vk,E4} = 250 \text{ kN (pistekuormat)}$$

Taulukko 6.6. Kuormakaavioiden LM71 mitoitusakselipainot, niiden tunnuksot sekä vastaavat staattiset nauhakuormien ja akselikuormien arvot [Liikennevirasto 2014b].

Kaluston sallittu akselipaino [kN]	Mitoituskuorma-kaavion tunnus	Mitoituskuorma-kaavion nauhakuorma, qvk [kN/m]	$\Delta qvk$ [kN/m]	Mitoituskuorma-kaavion akselikuormat, Qvk [kN]
170	LM71-17	60	58	188
225	LM71-22,5	80	76	250
250	LM71-25	88	84	275
300	LM71-30	106	102	333
350	LM71-35	120	111	370

Nämä kuorma-arvot ovat kuitenkin staattiselle junakuormalle ja mallinnuksessa tarkoitus on simuloida mahdollisimman tarkasti liikkuvan junan dynaamista vaikutusta ratarakenteille. Tämän takia kuormiin sovelletaan kvasistaattista menetelmää, jossa seisovan junan kuorma kerrotaan sysäyskertomella. Kun rakennemallin halki kulkevan junan alkunopeudeksi asetetaan  $V = 60$  km/h, saadaan sysäyskertomaksi  $\phi = 1,25$  seuraavasti [Liikennevirasto 2014b]:

$$\phi_V = 1 + n \left( 1 + 0,5 \frac{V-60}{K_i} \right), \text{ kun } V > 60 \text{ km/h} \quad (8.1)$$

$$\phi_V = 1 + n, \text{ kun } V \leq 60 \text{ km/h} \quad (8.2)$$

missä:

$n$  on pohjarakennustyömaan kohdalla aina 0,25,  
 $V$  on junan liikennöintinopeus, ja  
 $K_i = 80$  tavarajunille ja  $K_i = 190$  matkustajajunille.

Kvasistaattisen käsittelyn jälkeen kuormista muodostuu:

$$Q_{ks,LM71-35} = 370 \text{ kN} \times 1,25 = 463 \text{ kN (pistekuormat)}$$

$$q_{ks,LM71-35} = 120 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \times 1,25 = 150 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \text{ (nauhakuormat)}$$

$$Q_{ks,E4} = 250 \text{ kN} \times 1,25 = 313 \text{ kN (pistekuormat)}$$

Nämä arvot eivät kuitenkaan ole vielä tarpeeksi edustavia. Vaikka käytössä on 2D-mallinnusohjelma, mallinnuksessa pyritään dynaamisen vaikutuksen lisäksi tarkastelemaan mahdollisimman tarkasti tosimaailman kolmiulotteista tilannetta. Jotta mallinnuksesta voidaan saada ulos tosimaailman kolmiulotteiseen maailmaan suoraan soveltuvia tuloksia, täytyy lähtöarvoja korjata edelleen ottamaan huomioon 2D-mallinnusohjelman rajattu avaruus. Jotta tämä on mahdollista, tulee ymmärtää mallinnustekninen ero realistisen 3D-mallin ja rajatun 2D-mallin välillä Plaxis-ohjelmassa.

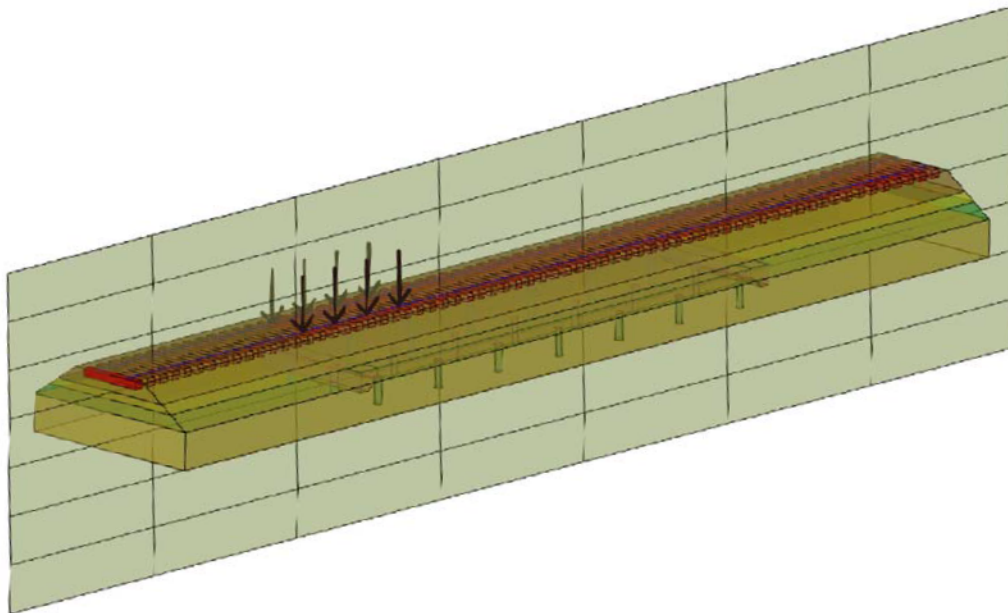
Otetaan esimerkki. Lähtökohdaksi valitaan 1,4 m korkea ratapenger, 20x5 m<sup>2</sup> pengerialaatta ja kuormakaavioksi LM71-35 ilman nauhakuormia (Kuva 6.13). Käytännössä tilanne vastaa työn geometriaa 5a/5b, 11a/11b tai 12a/12b (Kappale 6.6). Realistisessa 3D-mallissa kolmannessa ulottuvuudessa ratapölkyillä, pengerialaalla ja jokaisella

6.13)

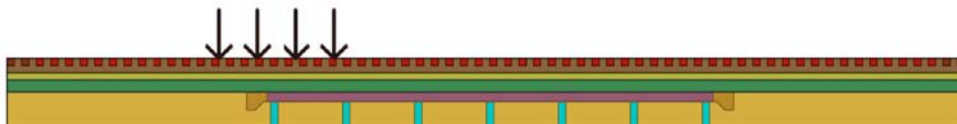
(Kuva

(Kuva 6.14)

(Kuva 6.15)

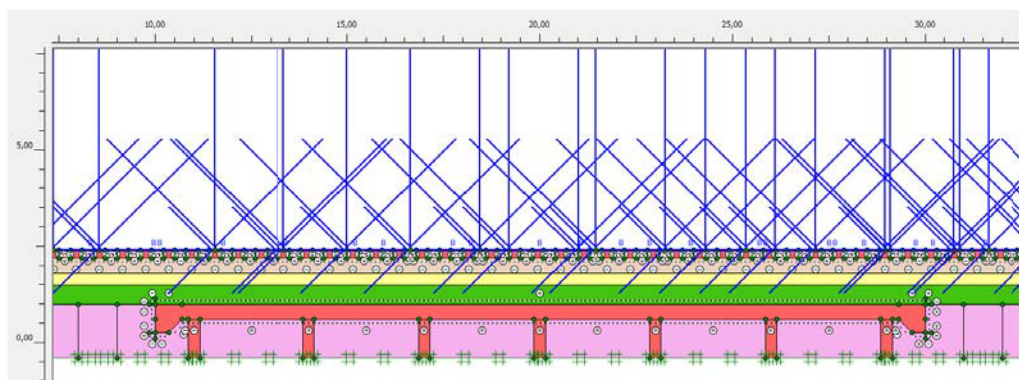


Kuva 6.13 Autocad 3D -havainnekuva radan kolmiulotteisesta rakennemallista, jonka pituusleikkausgeometria on työssä mallinnettu Plaxis 2D -ohjelman kaksiulotteiseen avaruuteen.



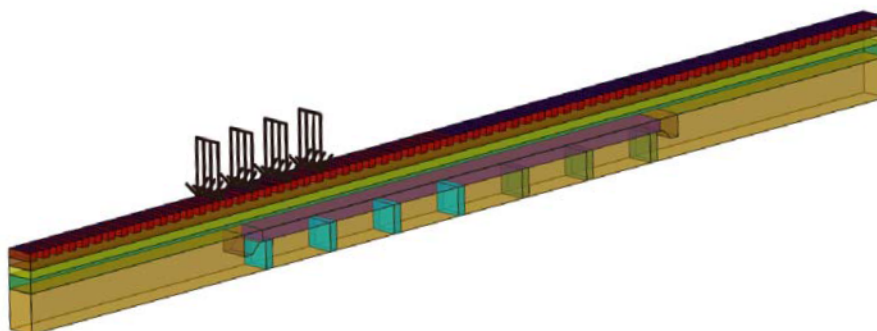
Kuva 6.14 Autocad 3D -pituusleikkaus radan kolmiuloitteisesta rakennemallista.





Kuva 6.15 Plaxis 2D -geometria, jossa on 1,4 m korkea ratapenger ja 20 m pitkä penglerlaatta. Kuvassa on esitetty useamman eri kuormitusvaiheen pisteuormat yhtä aikaisesti.

(Kuva 6.16)



Kuva 6.16 Plaxis 2D -ohjelman laskenta-algoritmin kolmiulotteinen tulkinta syötetystä 2D-geometriasta.

pölkyille, voidaan sekä kiskojen että kuormien lähtöparametrit skaalata ratapölkyn leveydellä (2,6 m) vastaamaan lähemmäs todellisia materiaalien jäykkyysuhteita ja kuormituksen suuruusluokkaa. Tämä skaalaus voidaan tehdä, koska rakennemallissa kiskon ja ratapölkyn liitos oletetaan täysin jäykäksi.

Jaetaan kvasistaattiset akselikuormat mallinnusulottuvuuskorjauskertoimella  $\alpha_{\text{muk}} = 2,6$  m. **Lopullisista työssä käytetyistä pystysuuntaisista junakuormista muodostuu:**

$$Q_{m,LM71-35} = 463 \text{ kN} \div 2,6 \text{ m} = 178 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \text{ (pistekuormat)}$$

$$q_{m,LM71-35} = 150 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \div 2,6 \text{ m} = 58 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \text{ (nauhakuormat)}$$

$$Q_{m,E4} = 313 \text{ kN} \div 2,6 \text{ m} = 120 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \text{ (pistekuormat)}$$

Jarrutuskuorma on kitkavoima, joka on junakuorman ja kitkakertoimen tulo. **Kun kitkakerroin on 0,25, työssä käytettävät vaakasuuntaiset jarrutuskuormat ovat:**

$$B_{m,0,25,LM71-35} = 178 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \times 0,25 = 44 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \text{ (pistekuormat)}$$

$$b_{m,0,25,LM71-35} = 58 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \times 0,25 = 14 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \text{ (nauhakuormat)}$$

$$B_{m,0,25,E4} = 120 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \times 0,25 = 30 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \text{ (pistekuormat)}$$

**Kun kitkakerroin on 0,4, työssä käytettävät vaakasuuntaiset jarrutuskuormat ovat:**

$$B_{m,0,4,LM71-35} = 178 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \times 0,4 = 71 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \text{ (pistekuormat)}$$

$$b_{m,0,4,LM71-35} = 58 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \times 0,4 = 23 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \text{ (nauhakuormat)}$$

$$B_{m,0,4,E4} = 120 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \times 0,4 = 48 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \text{ (pistekuormat)}$$

Kiskoteräs määritellään elastiseksi *Plate*-elementiksi. Sen materiaaliparametrit skaalautuvat seuraavasti:

$$EA_{1,\text{kisko}} = \frac{2 \times 207 \times 10^6 \text{ kPa} \times 7,686 \times 10^{-3} \text{ m}^2}{2,6 \text{ m}} = 1\,224\,000 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$EI_{\text{kisko}} = \frac{2 \times 207 \times 10^6 \text{ kPa} \times 3,055 \times 10^{-5} \text{ m}^4}{2,6 \text{ m}} = 4\,865 \frac{\text{kNm}^2}{\text{m}}$$

$$W_{\text{kisko}} = \frac{2 \times 60,34 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{2,6 \text{ m}} = 0,455 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Tässä mallinnuksessa lähtöarvoista ainoastaan kuormat ja kiskon parametrit skaalataan. Tämä antaa varmalla puolella olevan tuloksen, joka on vähemmän tulkinnanvarainen ja mallinnusteknisille muuttujille riippuvainen.

*mallinnuksessa korjataan ainoastaan lähtökuormat ja kiskon parametrit.*

*Tässä*

*va 6.17*

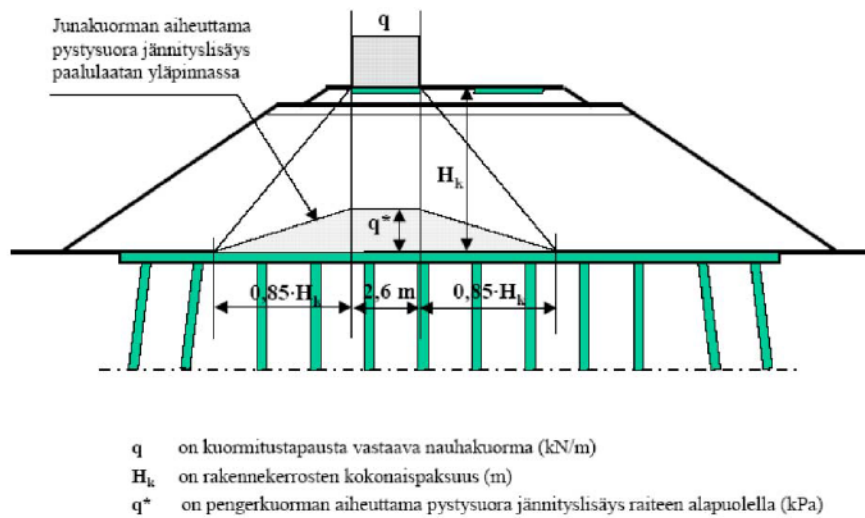
*Ku-*

*Kuva 6.18*

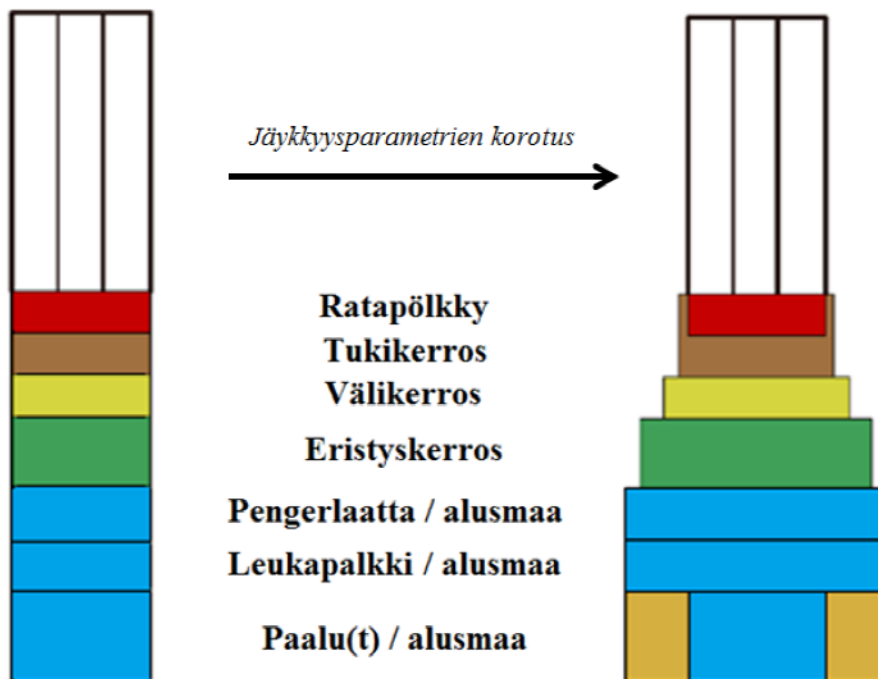
*Kuva 6.18*

*6.17*

*Kuva*



Kuva 6.17 Pystysuoran junakuorman jakautuminen ratapenkereen poikkileikkauksessa [Liikennevirasto 2014b].



Kuva 6.18 Periaatekuva siitä, miten radan rakennekerrosten jäykkyyssparametrien ehdotetun korotuksen Plaxis 2D -mallissa voi tulkita otettavan huomioon jännityksen todellisessa kolmiulotteisessa jakautumisessa.

Otetaan esimerkiksi tukikerroksen skaalaus. Ratapölkky on 2,6 m leveä ja tukikerros on 0,4 m korkea. Junakuorman aiheuttaman jännitystilän vaikutusleveys tukikerroksen alapinnassa on RATO 3:n mukaan (Kuva 6.17):

$$a_{\text{tuki,ala}} = 2,6 \text{ m} + 2 \times 0,85 \times 0,4 \text{ m} = 3,28 \text{ m}$$

Jännitystilän vaikutusleveyden keskiarvo tukikerroksessa on siten:

$$a_{\text{tuki,ka}} = \frac{2,6 \text{ m} + 3,28 \text{ m}}{2} = 2,94 \text{ m}$$

Kun koko skaalauksen referenssinä käytetään ratapölkyn leveyttä, saadaan tukikerroksen jäykkyysparametrien korjauskertoimeksi:

$$k_{\text{tuki}} = \frac{2,94 \text{ m}}{2,6 \text{ m}} = 1,13$$

Samalla menetelmällä voidaan määrittää väli- ja eristyskerroksen korjauskertoimet. Jos maarakennekerrosten jäykkyysparametreja korjaa, täytyy kuitenkin myös paalulaatan ja alusmaan jäykkyysparametreja korjata. Paalulaatta esittää todellisilla betonin parametreilla 2D-mallissa ainoastaan yhden metrin levyistä paalulaattaa, vaikka sen päälliset rakennekerrokset ovat nyt korjattu leveytensä osalta vastaamaan todellista jännitysjakaumaa suhteessa ratapölkyn leveyteen.

Paalulaatan ja alusmaan korjauskertoimen lähtökohdaksi otetaan paalulaatan oletettu leveys, 5 m. Koska tutkitaan paalulaatan pään jännitys- ja muodonmuutostilaa radan pituussuunnassa, alusmaa skaalataan yhtä leveäksi kuin paalulaatta: Näin ollen molemmille saadaan sama:

$$k_{\text{laatta}} = k_{\text{alusmaa}} = \frac{5,0 \text{ m}}{2,6 \text{ m}} = 1,92$$

Tällä menetelmällä lasketut korjauskertoimet kuormille ja materiaalien jäykkyysparametreille 2D-3D -skaalauksessa radan pituusleikkauksessa (ei poikkileikkauksessa) on esitetty taulukossa tässä kappaleessa (Taulukko 6.7).

Taulukko 6.7 Ehdotus 2D-mallin kuormien ja materiaalien jäykkyyssparametrien korjauskertoimiksi 2D-3D-skaalauksessa, jotta radan 2D-pituusleikkausmallin rakenneosien suhteelliset lähtöparametrit vastaisivat paremmin 3D-todellisuuden jännitysjakaumaa. Kerro todelliset jäykkyyssparametrit näillä korjauskertoimilla, syötä korjatut parametrit 2D-malliin ja aja malli -tulokset 2D-mallista ovat nyt lähempänä vastaavan 3D-mallin tuloksia. Tämä on siis oletus.

(kaksi kiskoa)	

\* Jos paalut ovat tarkastelun kannalta oleellisia, niille voi myös laskea korjauskertoimen. Taulukon esimerkkiarvossa on oletettu, että maassa on kolme 0,3 m leveää paalua vierekkäin.

liikkuvan

8.2)

(Kaava

(Kappale )

(Taulukko 6.8)

(Taulukko 6.9)

(Kuva 6.19)

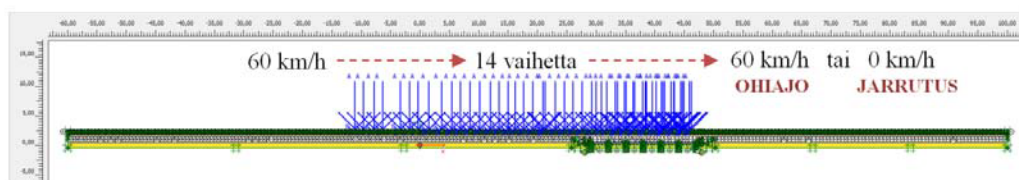




*Ohiajo*  
(Kappale 6.6)

*Jarrutus*

(Kappale o)



**Kuva 6.19** Mitoituskuormien sijoittelu liikkuvan junan mallintamiseksi on geometri-  
sesti sama sekä ohiajossa että jarrutuksessa. Kuormien vaikutusaika jo-  
kaisessa 14 kuormitusvaiheessa vaihtelee.

*(Taulukko 6.8 ja Taulukko 6.9)*

- *(Kappale 1)*
  - 
  -
- *(Kappale 6.5.1 )*
  - 
  - 
  - 
  - 
  -
- - 
  -
- - 
  - 
  -
- *(Kappale 6.4.1 )*
  - 
  -
- *(Kappale 6.5.4 )*
  - 
  -

*tau-*

*lukko 6.10 Työn geometriamatriisi*

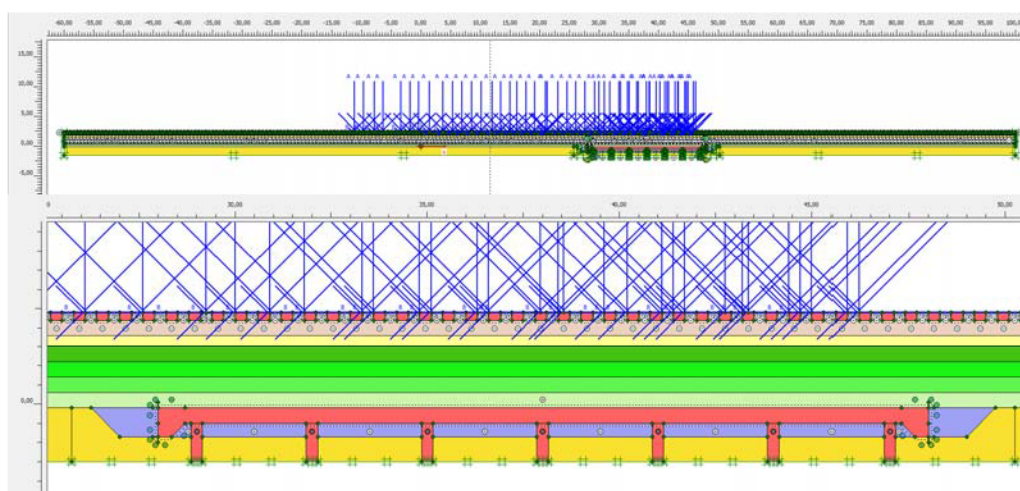
*(Kuva 6.20, Kuva 6.21, Kuva 6.22, Kuva 6.23, Kuva 6.24, Kuva 6.25, Kuva 6.26, Kuva 6.27)*

Taulukko 6.10 Työn geometriamatriisi.

Tunnus	Tapaus	Kitkakerroin	Kuormakaavio	Laatan pituus	Pengerkorkeus	Pistekuorma		Nauhakuorma		Geometria
						Pystykuorma	Vaakakuorma	Pystykuorma	Vaakakuorma	
1a	Ohiajo	-	Pistekuorma	20 m	1,4 m	178 kN	-	-	-	Uusi rata
1b	Jarrutus	0,25	Pistekuorma	20 m	1,4 m	178 kN	44 kN	-	-	Uusi rata
2a	Ohiajo	-	Pistekuorma	20 m	2,5 m	178 kN	-	-	-	Uusi rata
2b	Jarrutus	0,25	Pistekuorma	20 m	2,5 m	178 kN	44 kN	-	-	Uusi rata
3a	Ohiajo	-	Pistekuorma	20 m	5,0 m	178 kN	-	-	-	Uusi rata
3b	Jarrutus	0,25	Pistekuorma	20 m	5,0 m	178 kN	44 kN	-	-	Uusi rata
4a	Ohiajo	-	Pistekuorma	20 m	1,4 m	120 kN	-	-	-	Vanha rata
4b	Jarrutus	0,25	Pistekuorma	20 m	1,4 m	120 kN	30 kN	-	-	Vanha rata
5a	Ohiajo	-	LM71-35 (ei nauhakuormaa)	20 m	1,4 m	178 kN	-	-	-	Uusi rata
5b	Jarrutus	0,25	LM71-35 (ei nauhakuormaa)	20 m	1,4 m	178 kN	44 kN	-	-	Uusi rata
6a	Ohiajo	-	LM71-35 (ei nauhakuormaa)	20 m	2,5 m	178 kN	-	-	-	Uusi rata
6b	Jarrutus	0,25	LM71-35 (ei nauhakuormaa)	20 m	2,5 m	178 kN	44 kN	-	-	Uusi rata
7a	Ohiajo	-	LM71-35 (ei nauhakuormaa)	20 m	5,0 m	178 kN	-	-	-	Uusi rata
7b	Jarrutus	0,25	LM71-35 (ei nauhakuormaa)	20 m	5,0 m	178 kN	44 kN	-	-	Uusi rata
8a	Ohiajo	-	LM71-35 (ei nauhakuormaa)	40 m	1,4 m	178 kN	-	-	-	Uusi rata
8b	Jarrutus	0,25	LM71-35 (ei nauhakuormaa)	40 m	1,4 m	178 kN	44 kN	-	-	Uusi rata
9a	Ohiajo	-	LM71-35 (ei nauhakuormaa)	40 m	2,5 m	178 kN	-	-	-	Uusi rata
9b	Jarrutus	0,25	LM71-35 (ei nauhakuormaa)	40 m	2,5 m	178 kN	44 kN	-	-	Uusi rata
10a	Ohiajo	-	SFS-EN15528 E4 x 3 (kolme vaunua)	40 m	1,4 m	120 kN	-	-	-	Vanha rata
10b	Jarrutus	0,25	SFS-EN15528 E4 x 3 (kolme vaunua)	40 m	1,4 m	120 kN	30 kN	-	-	Vanha rata
11a	Ohiajo	-	SFS-EN15528 E4	20 m	1,4 m	120 kN	-	-	-	Vanha rata
11b	Jarrutus	0,25	SFS-EN15528 E4	20 m	1,4 m	120 kN	30 kN	-	-	Vanha rata
12a	Ohiajo	-	SFS-EN15528 E4	20 m	1,4 m	120 kN	-	-	-	Vanha rata
12b	Jarrutus	0,4	SFS-EN15528 E4	20 m	1,4 m	120 kN	48 kN	-	-	Vanha rata
13a	Ohiajo	-	LM71-35	20 m	1,4 m	178 kN	-	58 kN/m	-	Uusi rata
13b	Jarrutus	0,25	LM71-35	20 m	1,4 m	178 kN	44 kN	58 kN/m	14 kN/m	Uusi rata

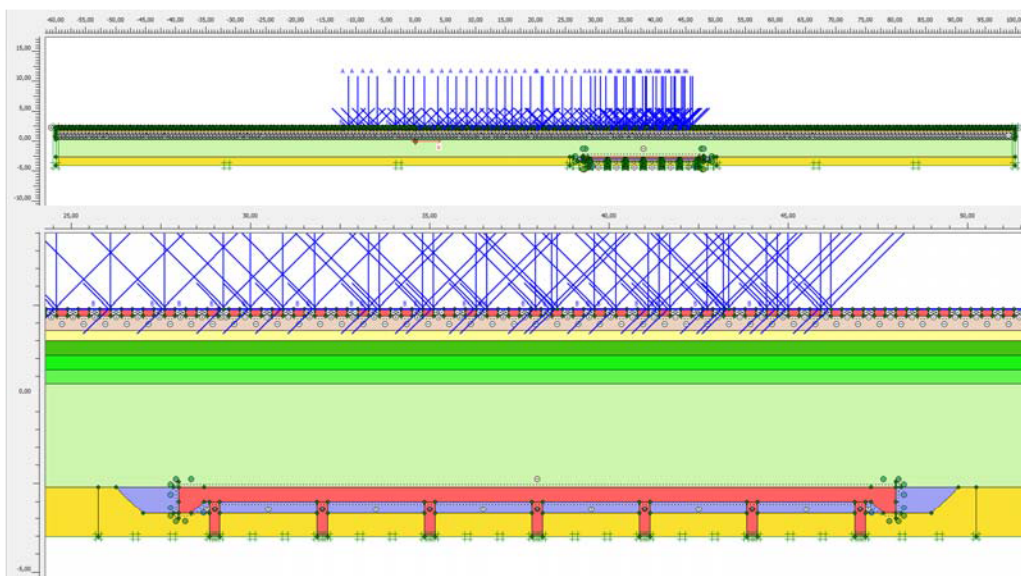


Kuva 6.20 Geometria 6a/6b: kitkakerroin 0,25 – kuormakaavio LM71-35 (ilman nauhakuormia) – pengerlaatan pituus 20 m – pengerkorkeus 2,5 m – uuden radan geometria.

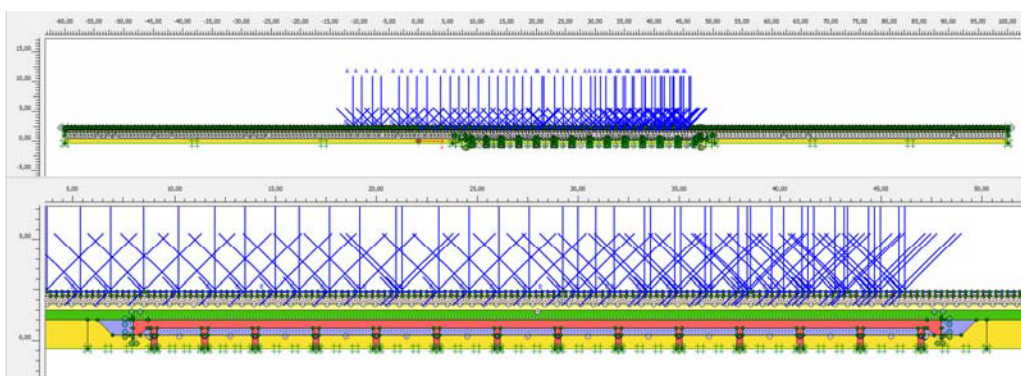


Kuva 6.21 Geometria 5a/5b: kitkakerroin 0,25 – kuormakaavio LM71-35 (ilman nauhakuormia) – pengerlaatan pituus 20 m – pengerkorkeus 1,4 m – uuden radan geometria.

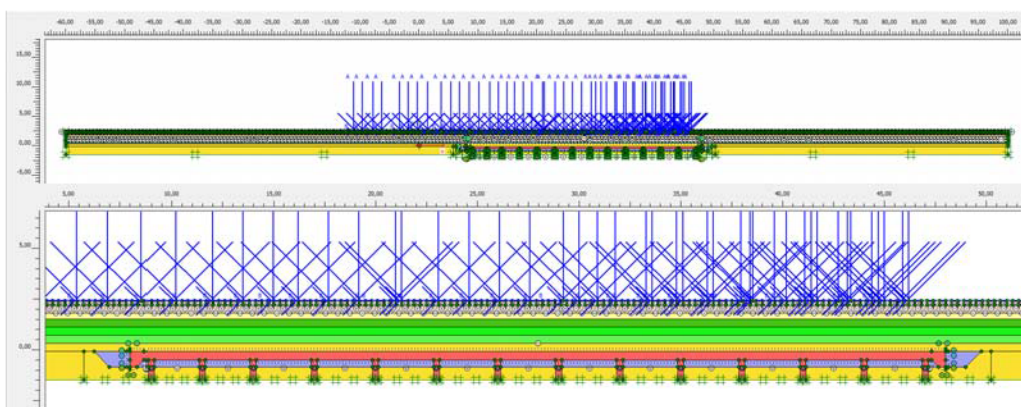




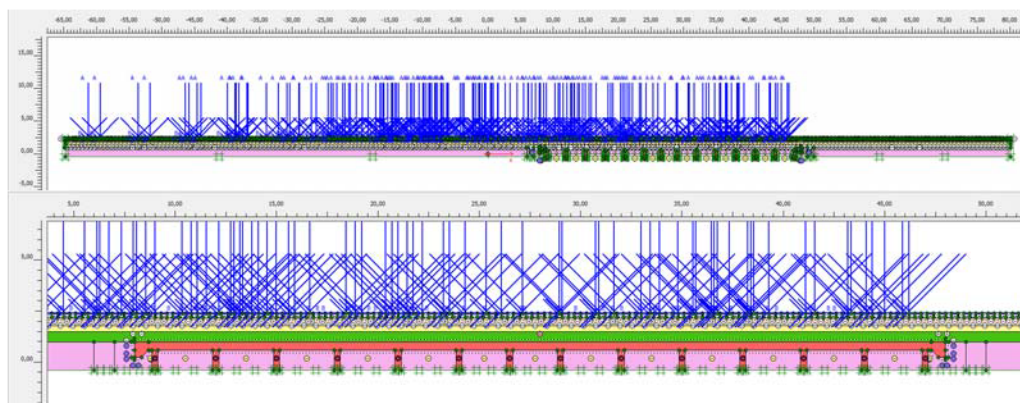
Kuva 6.22 Geometria 7a/7b: kitkakerroin 0,25 – kuormakaavio LM71-35 (ilman nauhakuormia) – pengerlaatan pituus 20 m – pengerkorkeus 5,0 m – uuden radan geometria.



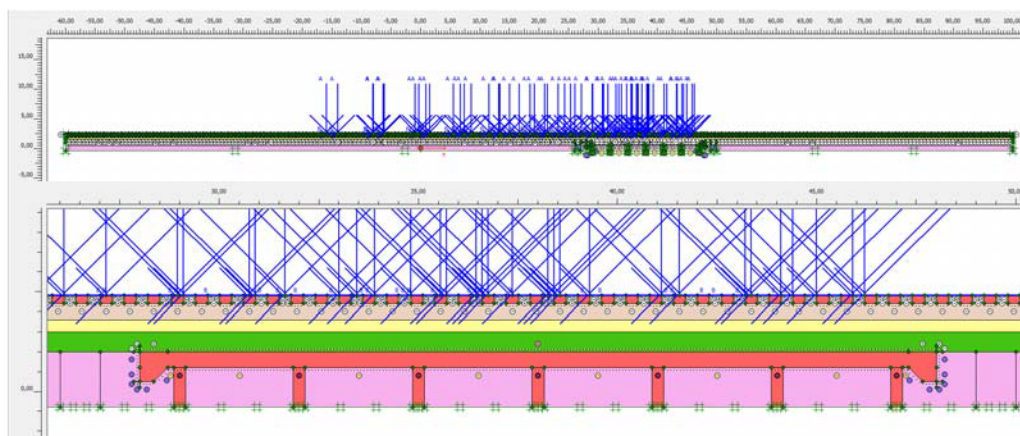
Kuva 6.23 Geometria 8a/8b: kitkakerroin 0,25 – kuormakaavio LM71-35 (ilman nauhakuormia) – pengerlaatan pituus 40 m – pengerkorkeus 1,4 m – uuden radan geometria.



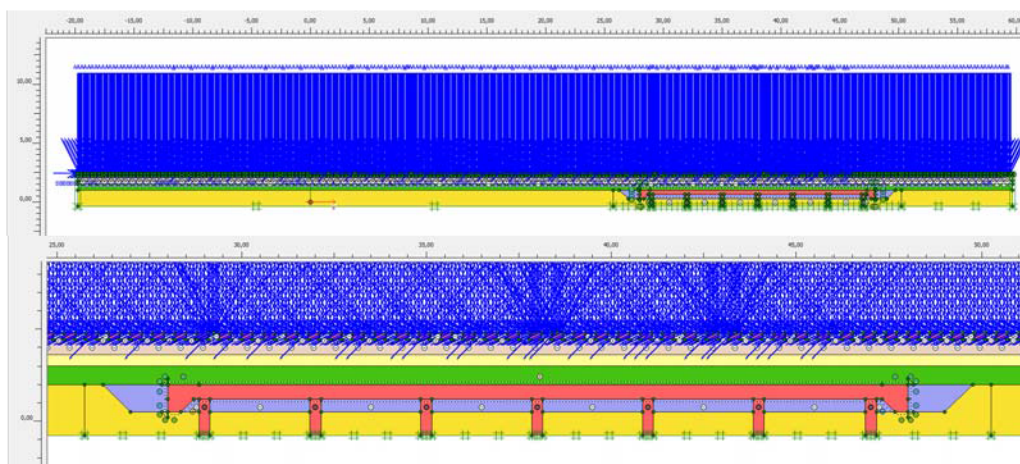
Kuva 6.24 Geometria 9a/9b: kitkakerroin 0,25 – kuormakaavio LM71-35 (ilman nauhakuormia) – pengerlaatan pituus 40 m – pengerkorkeus 2,5 m – uuden radan geometria.



Kuva 6.25 Geometria 10a/10b: kitkakerroin 0,25 – kuormakaavio E4 (kolme vau-  
nua) – pengerlaatan pituus 40 m – pengerkorkeus 1,4 m – vanhan radan  
geometria.



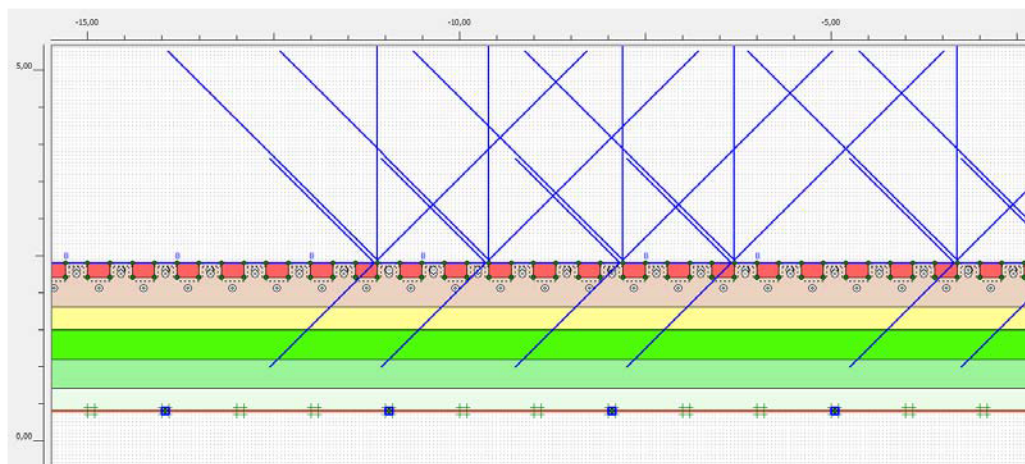
Kuva 6.26 Geometria 11a/11b & 12a/12b: kitkakerroin 0,25/0,4 – kuormakaavio E4  
– pengerlaatan pituus 20 m – pengerkorkeus 1,4 m – vanhan radan geo-  
metria.



Kuva 6.27 Geometria 13a/13b: kitkakerroin 0,25 – kuormakaavio LM71-35 (nauha-  
kuormien kanssa) – pengerlaatan pituus 20 m – pengerkorkeus 1,4 m –  
uuden radan geometria.

*Kuva 7.1*





Kuva 7.1 Rakennemallikokeilu, jossa maakerrokset päättyvät suoraan rakennemallin alareunaan.

Plate

Kuva 7.2

Plate

Plate

Kuva

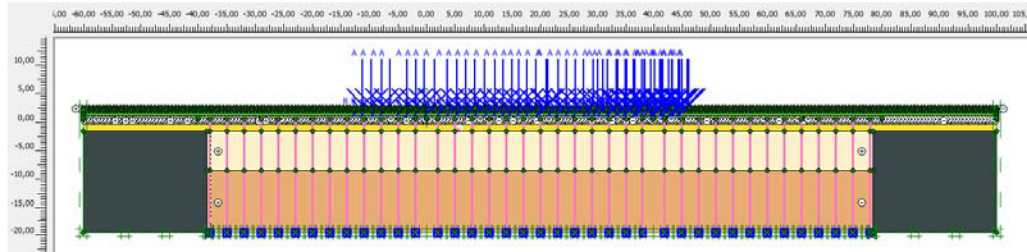
7.2

Interface

Plate

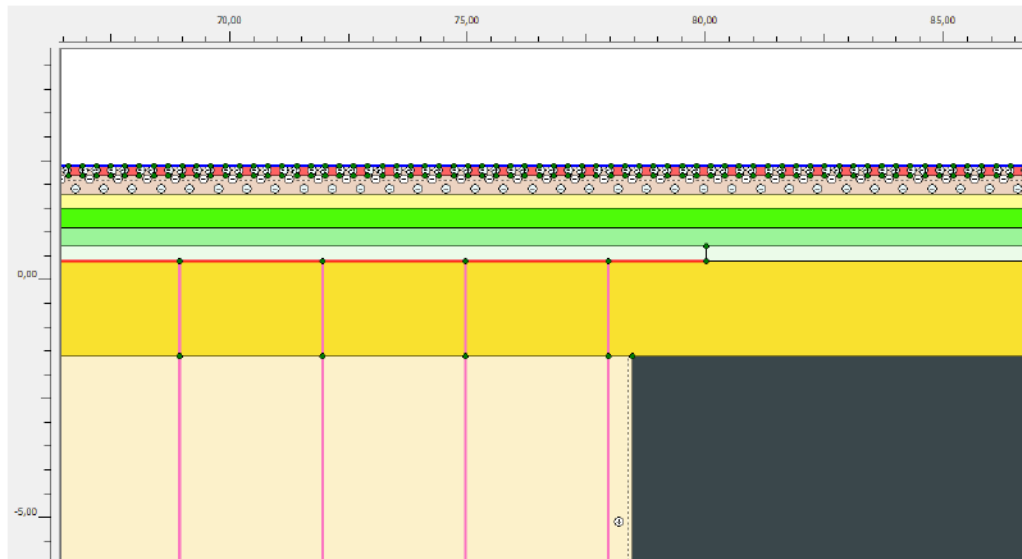
(Kappale o)

(Kappale 7.2.3)



Kuva 7.2 Rakennemallikokeilu, jossa on Plate-elementeillä mallinnettuja pitkiä paa-luja, kolme 40 m pitkää pengerlaattaa ja kallio molemmissa reunoissa tu-kemassa yläpuolisia maakerroksia.

Kuva 7.3



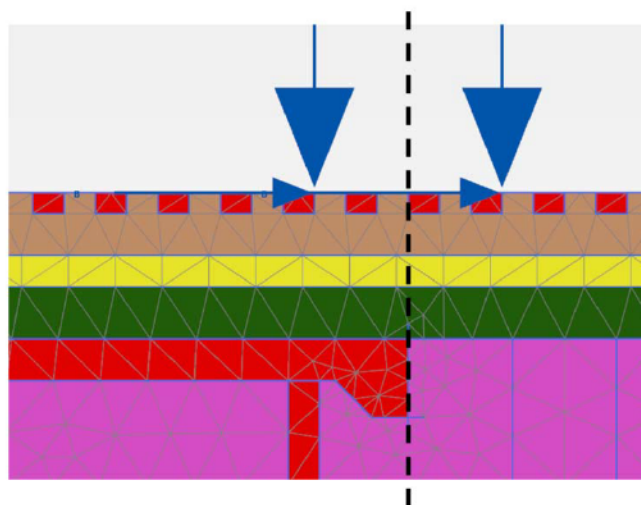
Kuva 7.3 Rakennemallikokeilu, jossa pitkien paalujen takia syvää pehmeikköä (keltainen) pitää tukea lisäämällä kallio (musta) pengerialueen päähän.

(Kuva 7-4)

face

(Kappale 6.3.2 )

Inter-

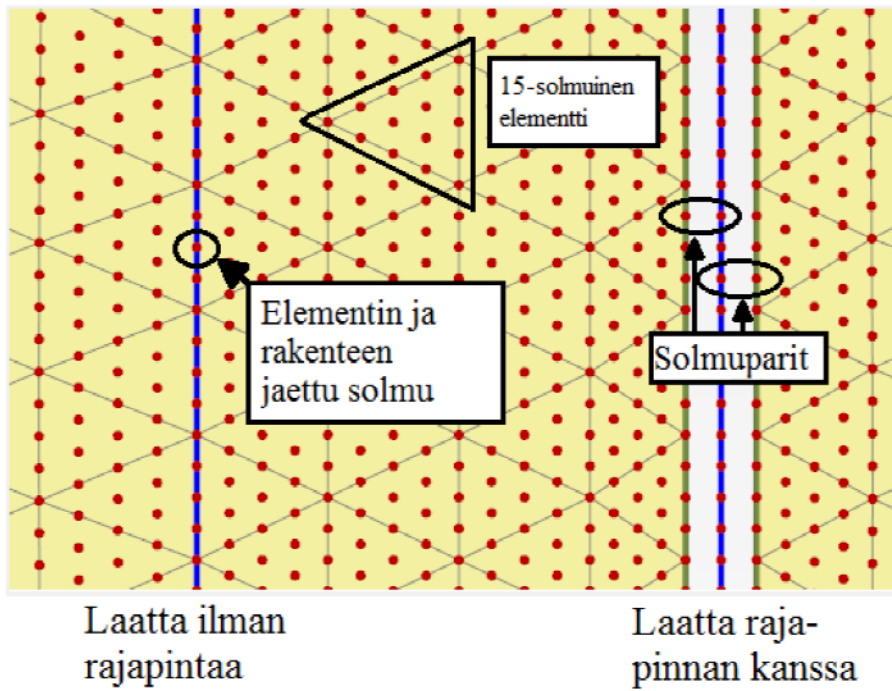


Kuva 7-4. Pistekuormat ylittävät pengerialueen päädyn pohjamaan puolelle.

Interface

(Kuva 7.5)

*Interface*  
(Kappale o)



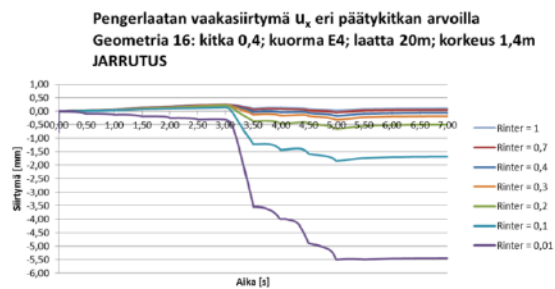
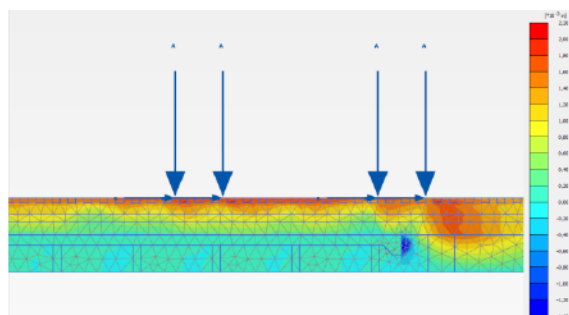
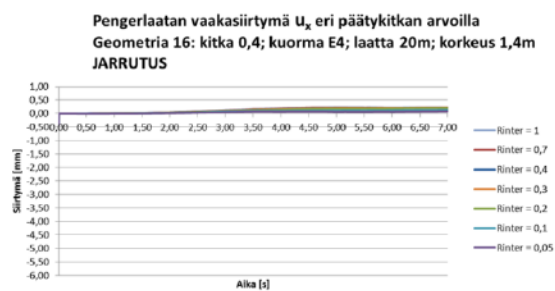
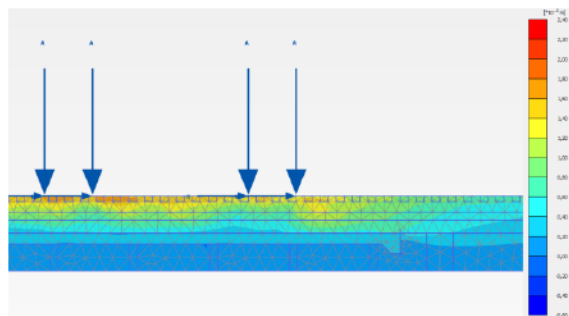
Kuva 7.5 Solmuparit Plaxis 2D -ohjelman Interface-elementissä.

*Interface*

*Interface*

va 7.6

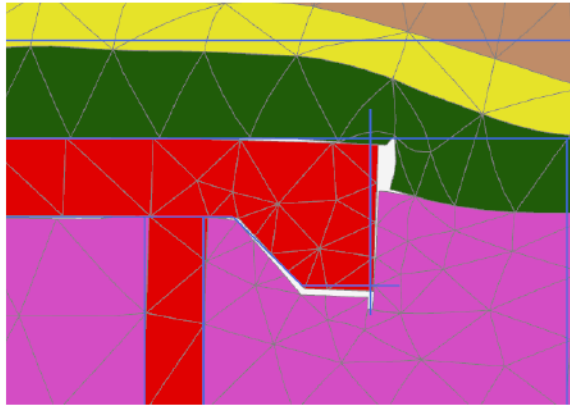
Ku-



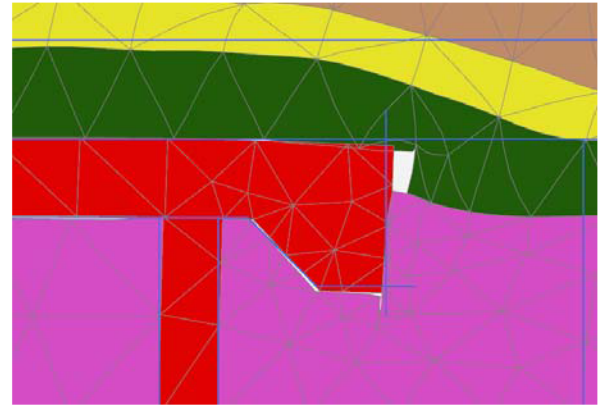
Kuva 7.6 Vaakasiirtymäjakaumat ja -kuvaajat, kun juna pysähtyy pengerlaatan päälle (yllä) vs. juna ajaa pengerlaatan pään yli (alla). Vertailtavat geometriat ovat kaikilta muilta osin samat junakuormien sijaintia lukuun ottamatta. Vaakasiirtymä on mitattu maan puolelta.

(Kuva 7.7)

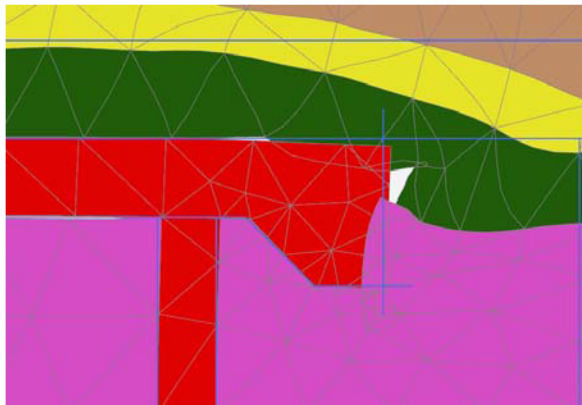
(mesh)



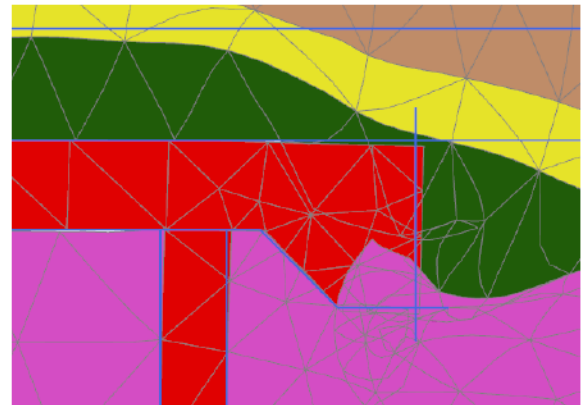
$$R_{inter} = 1,00$$



$$R_{inter} = 0,40$$



$$R_{inter} = 0,20$$



$$R_{inter} = 0,10$$

Kuva 7.7 Herkkyystarkastelu: Verkkopinnan epämuodostuma leukapalkin ja maan välisen kitkakertoimen (Plaxis-ohjelmassa verrattavissa  $R_{inter}$  -parametriin) eri arvoilla kuormituksessa.

(Kappale 7.2.4 )

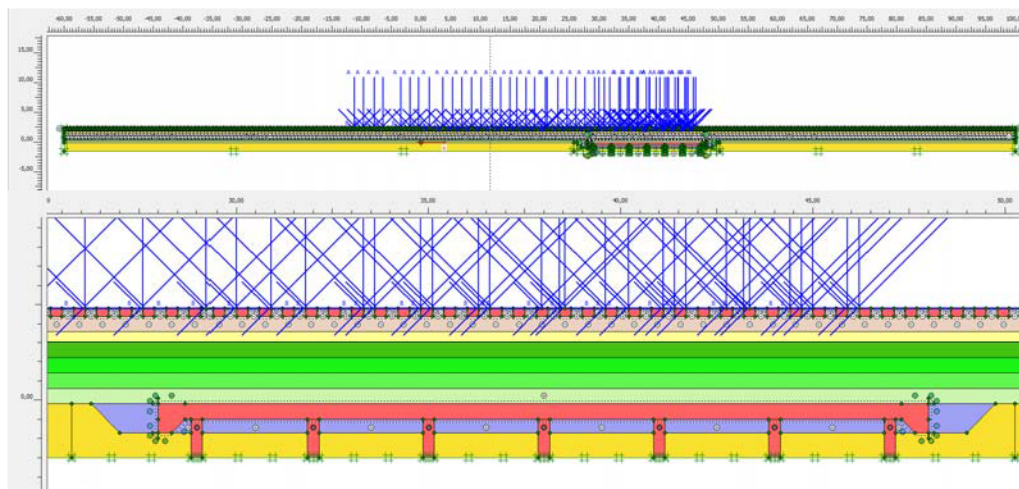
(Taulukko 7.1)

Kuva 7.8

Taulukko 7.1 Mallinnuksen vaiheet Plaxis 2D -ohjelmassa.

<b>Geometria</b>	
	Geometry line
	Geometry line
	Plate-
	Interface
	Geometry line
	Interface (Taulukko 8-4)
	Material sets
	Standard fixities
<b>Kuormitus</b>	
	LM71-35 ja E4: Neljä pystypistekuormaa, neljä vaakapistekuormaa, (nauhakuormat) E4 kolmella vaunulla: 12 pystypistekuormaa, 12 vaakapistekuormaa
	LM71-35 ja E4: yhteensä 56 pystypistekuormaa, 56 vaakapistekuormaa, (nauhakuormat) E4 kolmella vaunulla: yhteensä 168 pystypistekuormaa, 168 vaakapistekuormaa
<b>Elementtiverkko</b>	
	Mesh
<b>Laskenta</b>	

(Taulukko 7.2)



Kuva 7.8 Esimerkkinä Geometria 6a/6b lopullisesta rakennemallista.

(Kappale 6.5.4)



Taulukko 7.2 Laskentavaiheet Plaxis 2D -ohjelmassa.

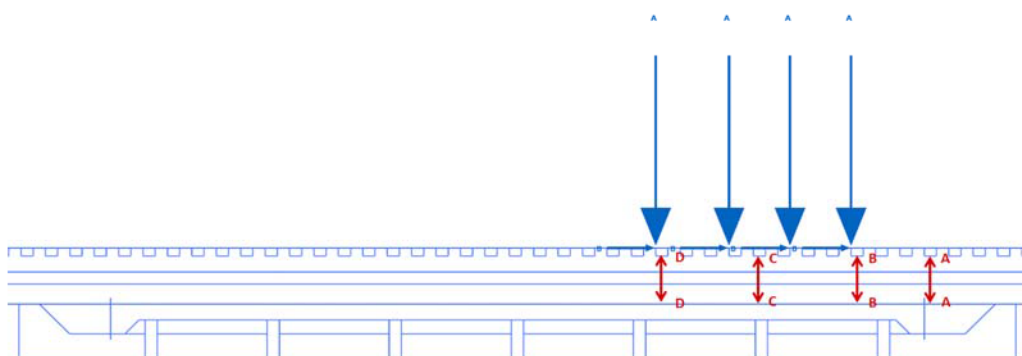


Hardening soil

*(Kuva 8.1, Kuva 8.2, Kuva 8.3)*

*(Kappale 8.5.2     Liite 5)*

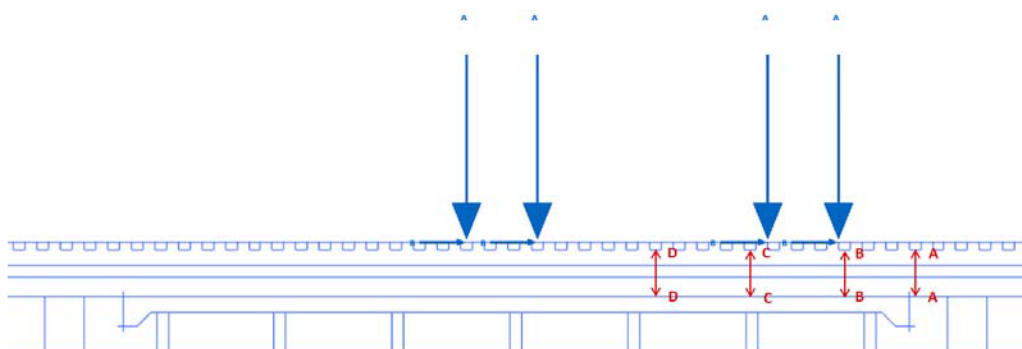
*(Kappale 8.6 )*



Kuva 8.1. Poikkileikkaukset A-A, B-B, C-C ja D-D geometriatarkasteluissa 5, 6, 7, 8, 9 ja 13, joissa on LM71-35-kuormakaavio joko nauhakuormien kanssa tai ilman.



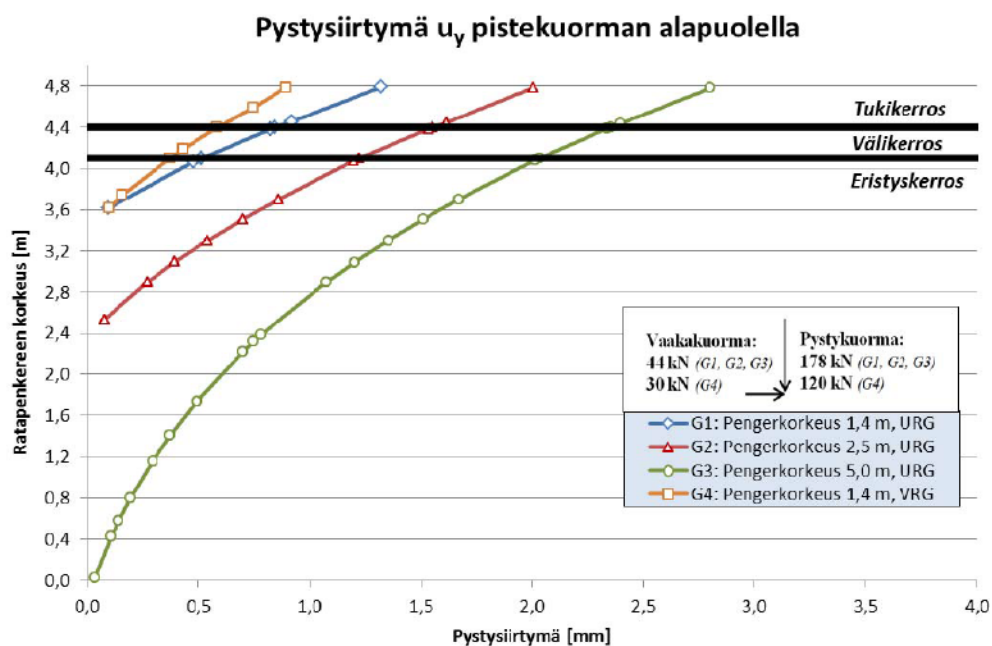
Kuva 8.2 Poikkileikkaukset A-A, B-B, C-C ja D-D geometriatarkastelussa 10, jossa on kolme E4-kuormaakaaviota (ensimmäinen E4-kuormakaavio on kuvan ulkopuolella vasemmalla).



Kuva 8.3 Poikkileikkaukset A-A, B-B, C-C ja D-D geometriatarkasteluissa 11 ja 12, joissa on E4-kuormakaavio.

(Kuva 8.4)

(Kuva 8.4)



Kuva 8.4 Pistekuorman aikaansaama pystysiirtymä suoraan kuormituspisteeseen alla. Tuloksissa on mukana jarrutuskuorma, joka ei vaikuttanut pystysiirtymien suuruuteen.

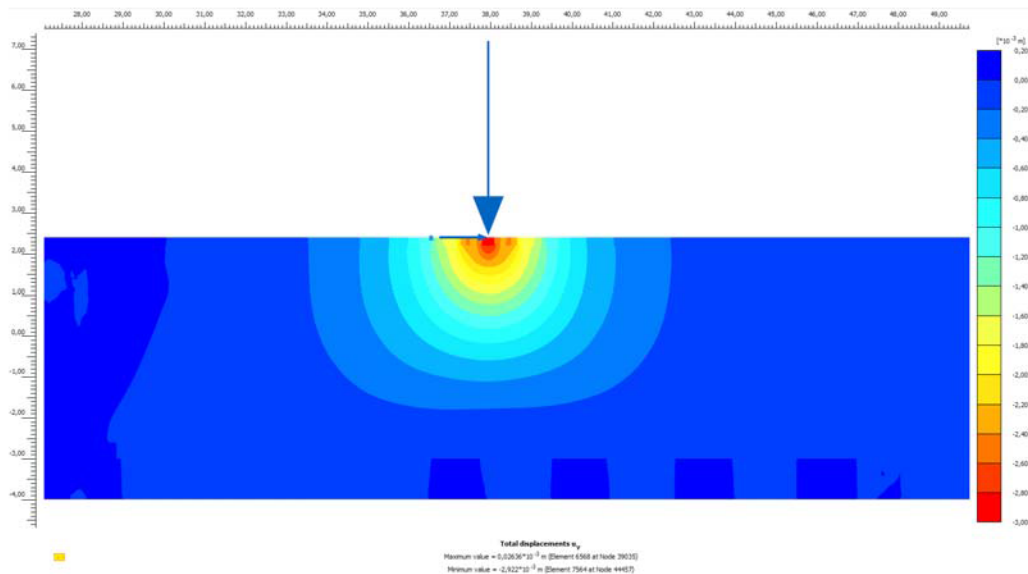
(Taulukko 8.1)

*Taulukko 8.1 Ratapölkyn hetkellinen pystysiirtymä [mm] Vinterin rakennemalleissa [2015]. 2D -laskennoissa radan poikkileikkaus. Kuormituksena E4: 3D-malleissa 125 kN pistekuormat ja 2D-malleissa redusoidut viivakuormat 463 kN/m².*

Penger- korkeus	Pohja- maan moduuli	3D-laskenta			2D-laskenta		
		Vertailu	P86	P90	Vertailu	P86	P90
1,6 m	3 MPa	17,24	18,88	21,30	-	42,31	42,19
	50 MPa	2,34	2,77	2,78	3,17	3,58	3,55
	200 MPa	1,11	1,47	1,46	1,19	1,51	1,48
4,6 m	3 MPa	7,78	10,04	9,94	22,50	30,69	30,56
	50 MPa	1,9	3,10	3,07	2,82	6,09	5,92
	200 MPa	1,36	2,36	2,24	1,57	4,60	4,37

(Kuva 8.5)

(Liite 1)



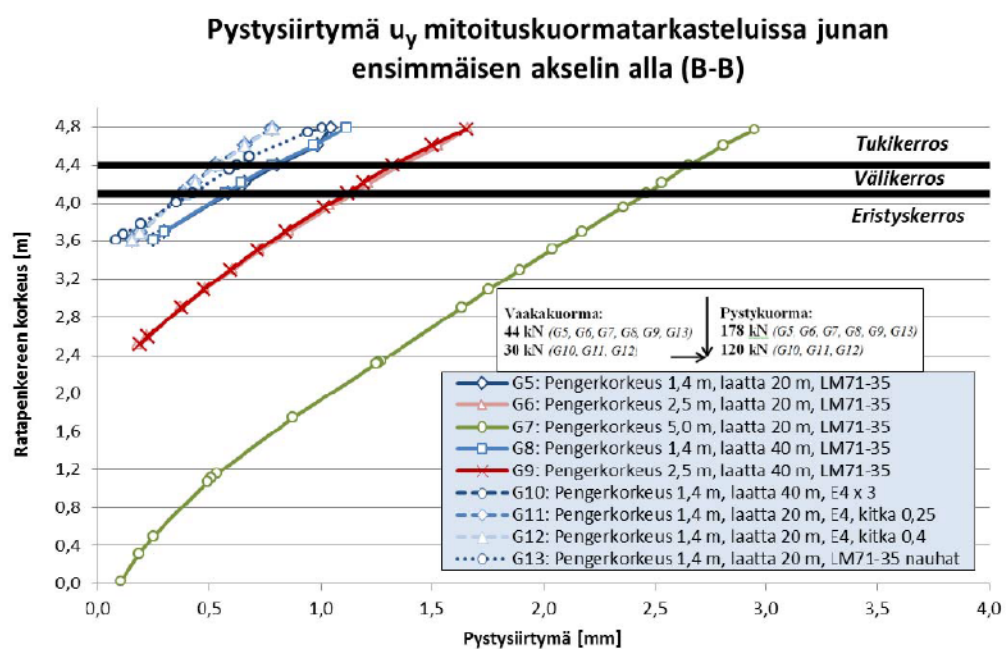
Kuva 8.5 Pistekuorman aikaansaama pystysiirtymä Geometriassa 4, kun penkereen korkeus on 5,0 m. Skaala: 0 (sininen)...3,0 mm (punainen).

(Kuva 8.1, Kuva 8.2, Kuva 8.3)

(Kuva 8.6)  
(Taulukko 8.2)

(Kuva 8.6)

(Taulukko 8.1)

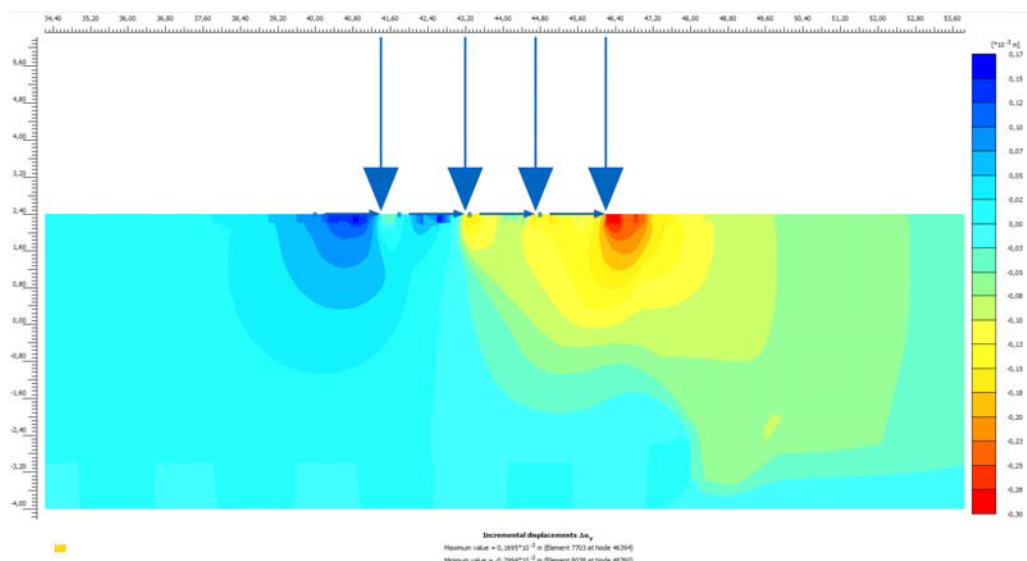


**Kuva 8.6** Mitoituskuormien aikaansaama pystysiirtymä mittaussuoralla B-B. Jarutuskuorma ei vaikuttanut pystysiirtymien suuruuteen.

**Taulukko 8.2** Ratapölkyn alapinnasta mitattu maksimipystysiirtymä [mm].

		Pengerkorkeus		
Geometria				

**Kuva 8.7**



Kuva 8.7 Mitoituskuorman aikaansaama inkrementaalinen pystysiirtymä Geometriassa 7b, kun penkereen korkeus on 5,0 m. Skaala: 0,17 (sininen)...0,30 mm (punainen).

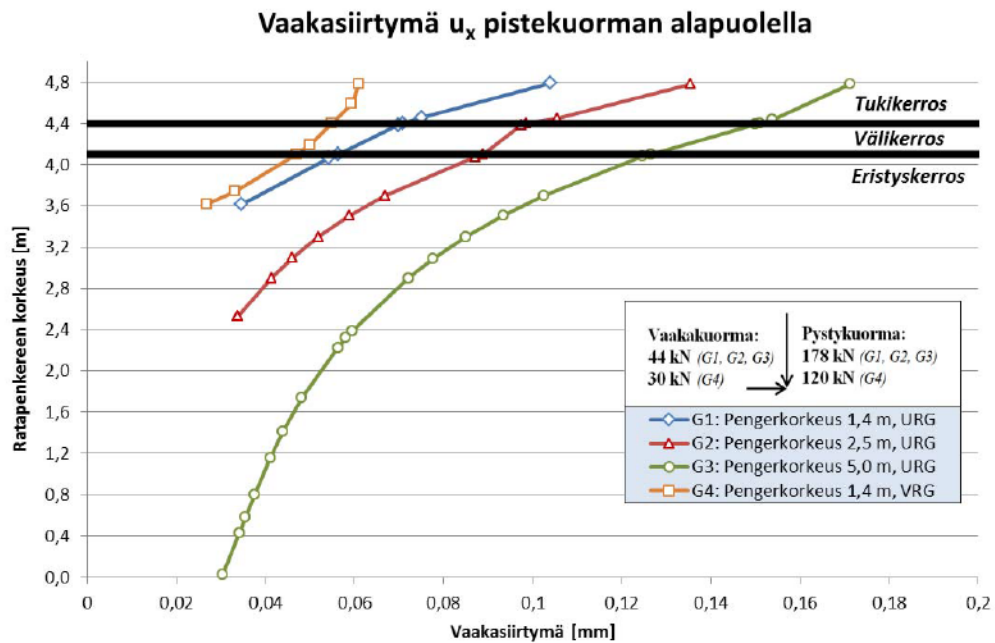
(Kuva 8.8)

Kuva 8.9

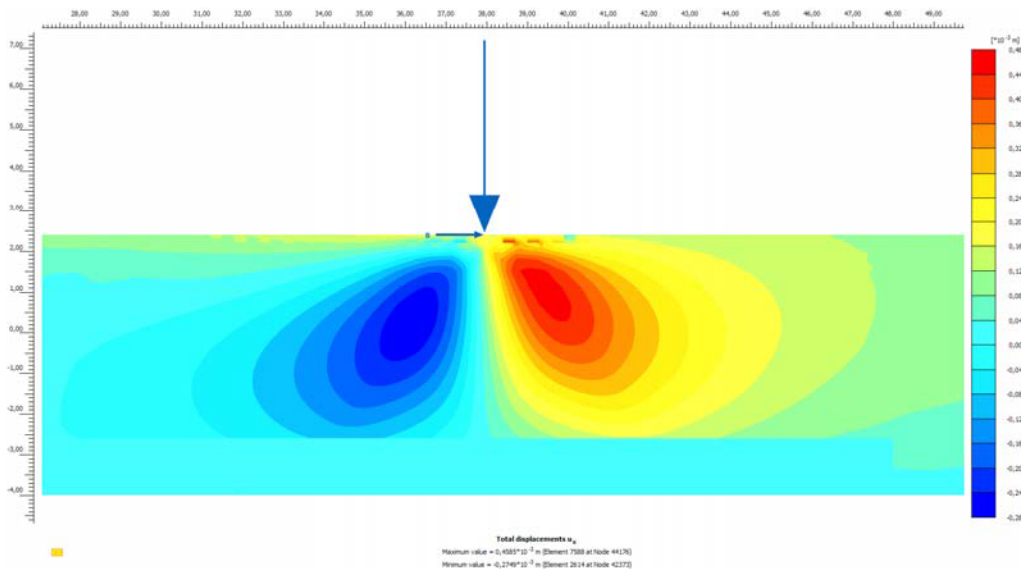
Kuva 8.9

(Taulukko 8.3)



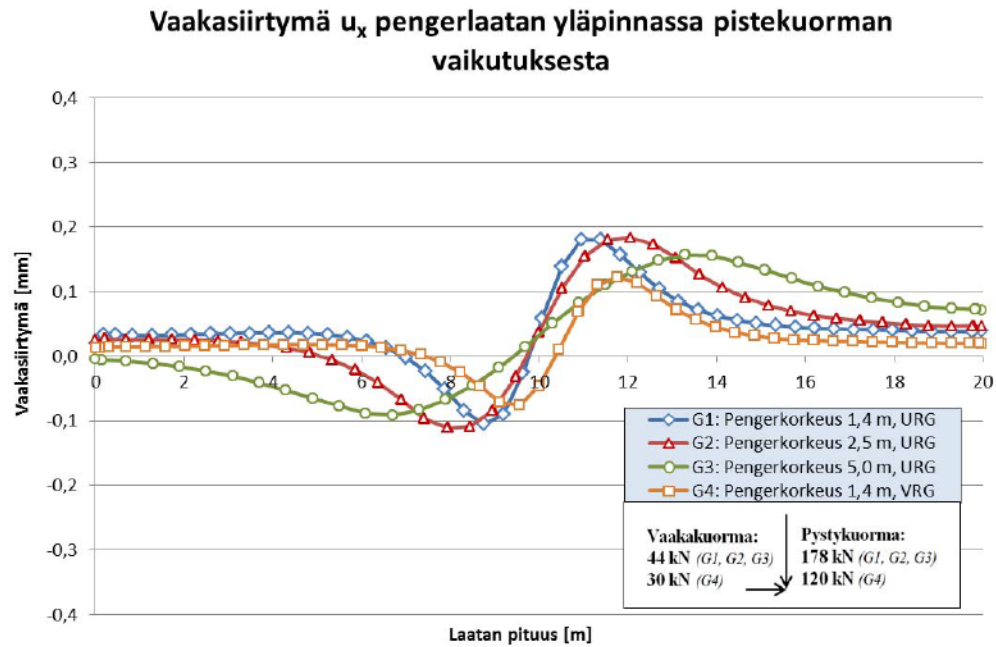


**Kuva 8.8** Pistekuorman aikaansaama vaakasiirtymä suoraan kuormituspisteen alla. Tuloksissa on mukana jarrutuskuorma, joka ei vaikuttanut vaakasiirtymien suuruuteen. Nämä tulokset eivät edusta vaakasiirtymän maksimiarvoja rakennemallissa (ks. teksti).



**Kuva 8.9** Pistekuorman aikaansaama vaakasiirtymä Geometriassa 4, kun penkereen korkeus on 5,0 m. Skaala: -0,28 (sininen)...0,48 mm (punainen).

Kuva 8.10

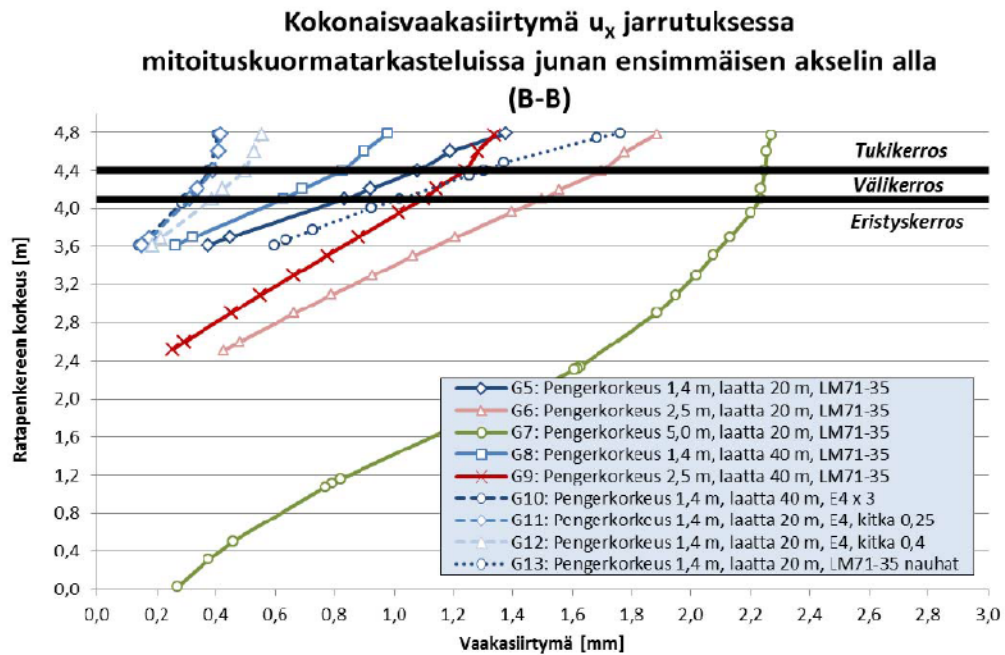


Kuva 8.10 Pistekuorman aikaansaama vaakasiirtymä penglerlaatan yläpinnan tasossa. Tuloksissa on mukana jarrutuskuorma, joka ei vaikuttanut vaakasiirtymien suuruuteen.

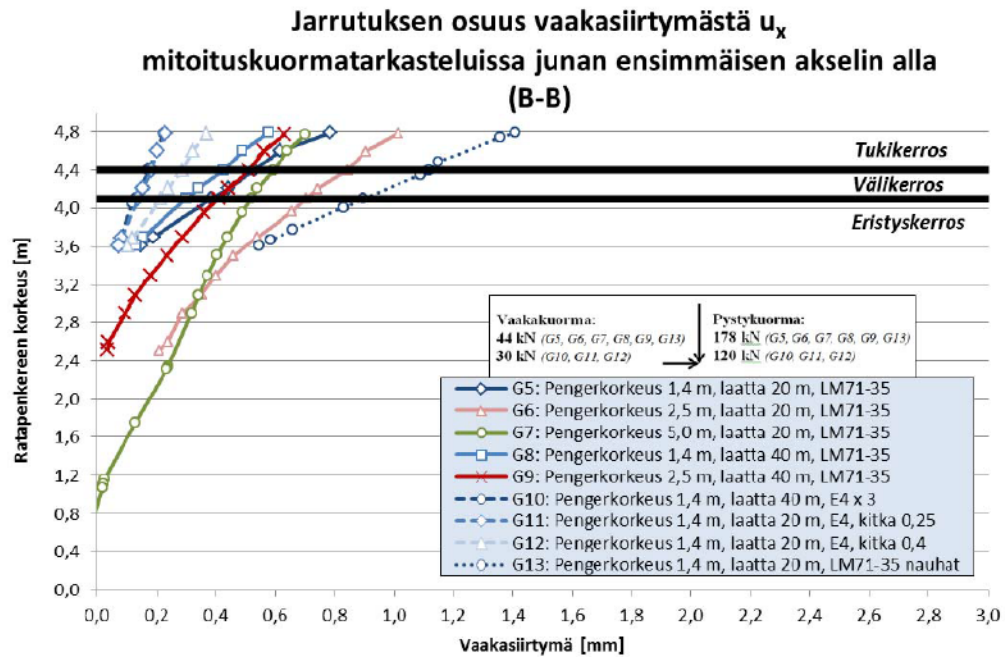
(Kuva 8.11)

(Kuva 8.12)

(Kuva 8.13, Kuva 8.14)



Kuva 8.11 Mitoituskuormien aikaansaama vaakasiirtymä jarrutuksessa mittaus-suoralla B-B.



Kuva 8.12 Jarrutuksen aikaansaama osuus mitoituskuormien vaakasiirtymästä mittaus-suoralla B-B.

(Taulukko 8.3)

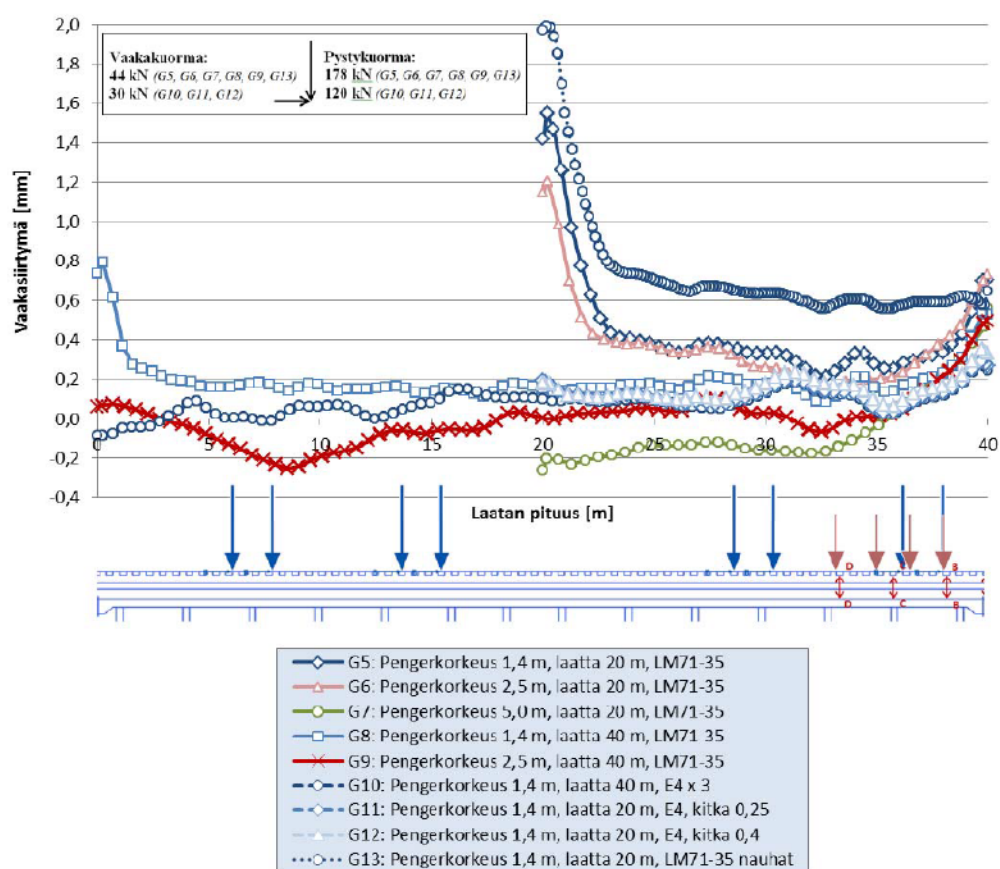
Taulukko 8.3 Ratapölkyn alapinnasta mitattu maksimivaakasiirtymä [mm].

		Pengerkorkeus		
Geometria				

(Kuva 8.13)

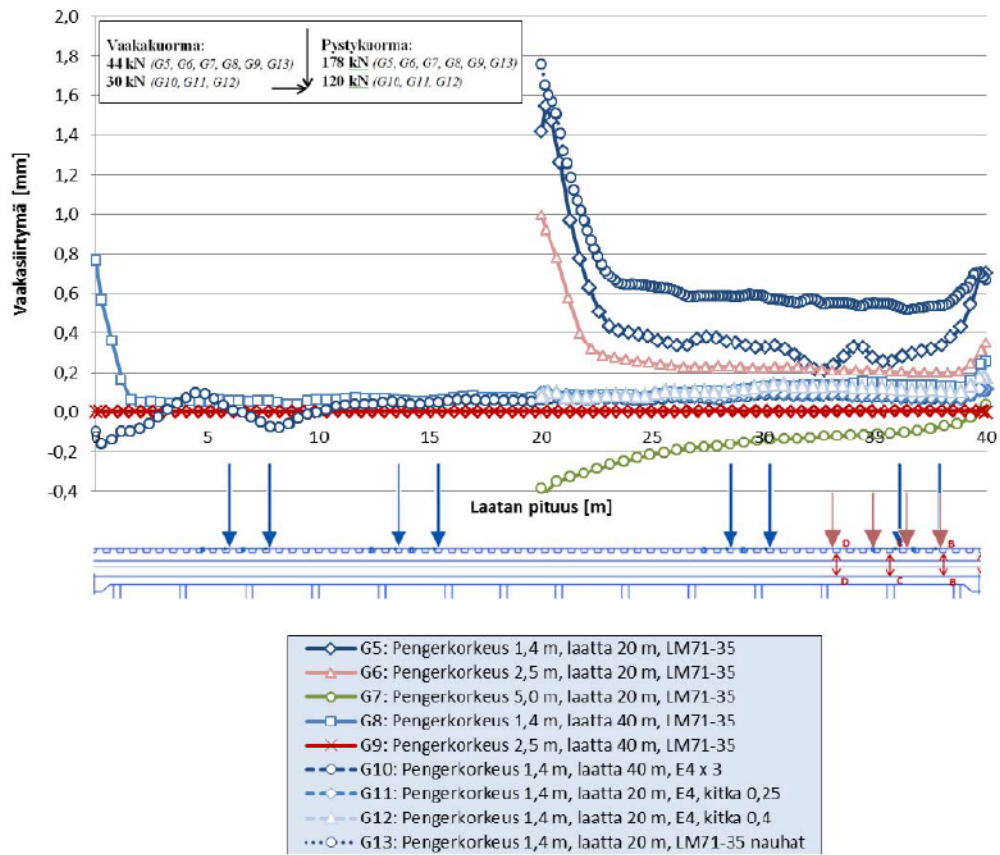
(Kuva 8.14)

Kokonaisvaakasiirtymä  $u_x$  jarrutuksessa pengerlaatan  
yläpinnassa mitoituskuormatarkasteluissa



Kuva 8.13 Mitoituskuormien aikaansaama vaakasiirtymä pengerlaatan yläpinnan tasossa jarrutuksessa.

### Jarrutuksen osuus vaakasiirtymästä $u_x$ pengerlaatan yläpinnassa mitoituskuormatarkasteluissa



Kuva 8.14 Jarrutuksen aikaansaama osuus mitoituskuormien vaakasiirtymästä pengerlaatan yläpinnan tasossa.

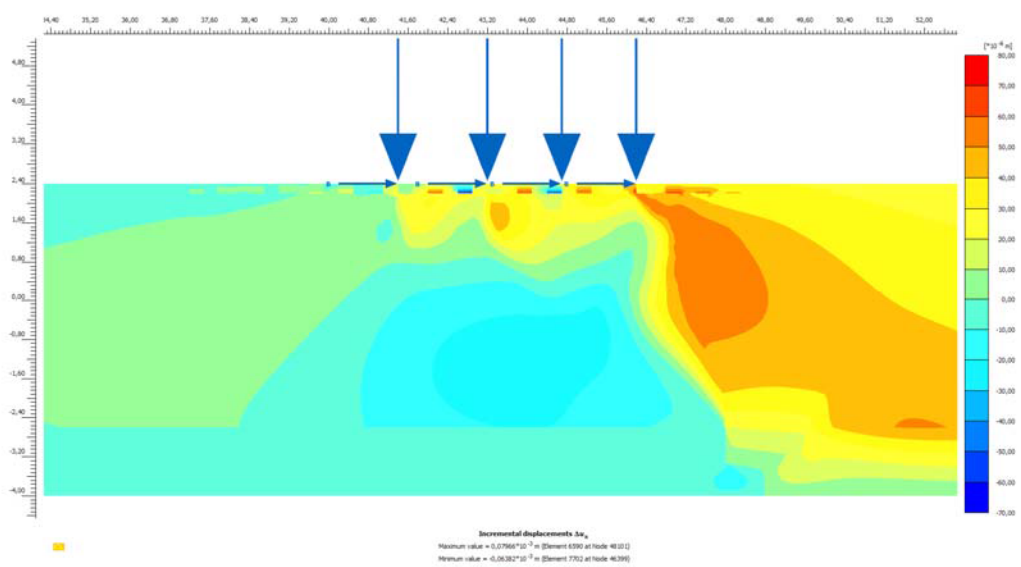
(Kuva 8.13, Kuva 8.14)

Interface

-  
-  
-  
-

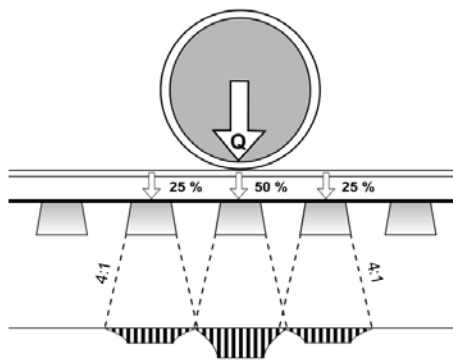
(esimerkiksi)

Kuva 8.15)

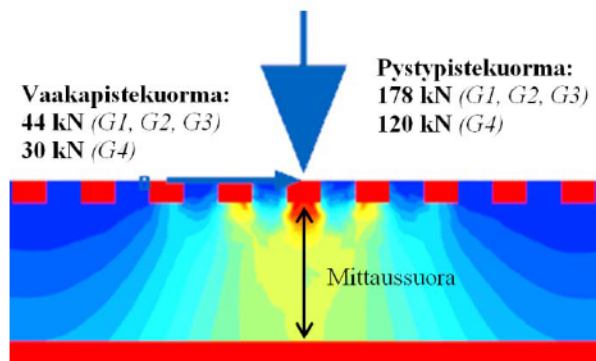


Kuva 8.15 Mitoituskuorman aikaansaama inkrementaalinen vaakasiirtymä Geometriassa 7b, kun penkereen korkeus on 5,0 m. Skaala: -0,07 (sininen)...0,08 mm (punainen).

(Kuva 8.16a)



(Kuva 8.16b)



Kuva 8.16a. Pystysuoran junakuorman jakaantuminen ratapölkkyistä ratapenkereeseen. [Liikennevirasto 2014]

Kuva 8.16b. Mittausuora tämän työn pistekuorimatarkastelutapauksissa. Esimerkikuvana pystyjännitysjauma G1b:ssä.

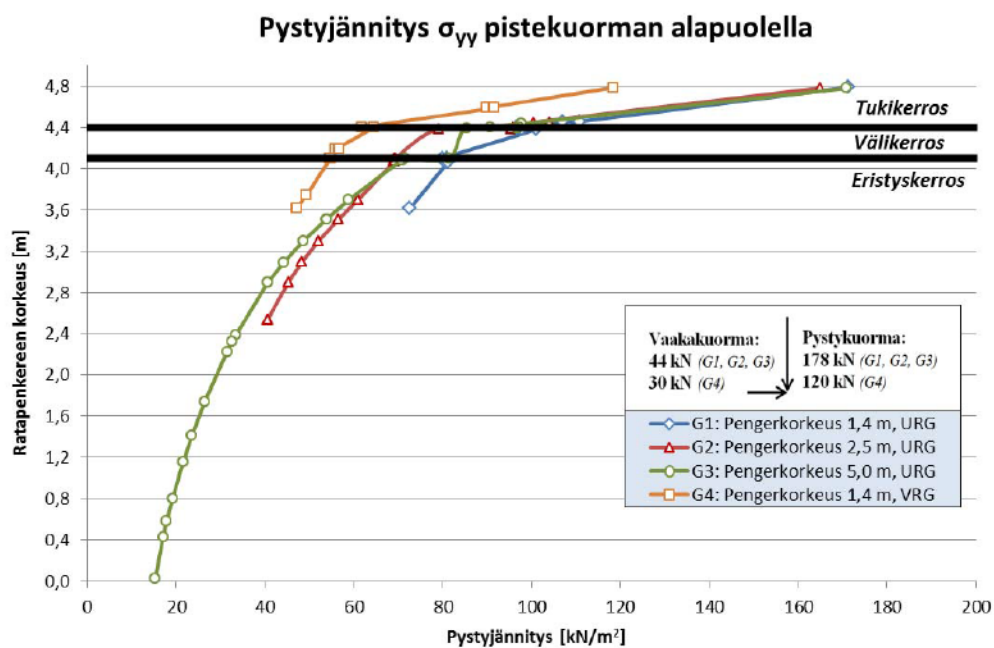
(Kappale 7.3 )

(Kuva 8.17)



(Kuva 8.17)

Kuva 8.18

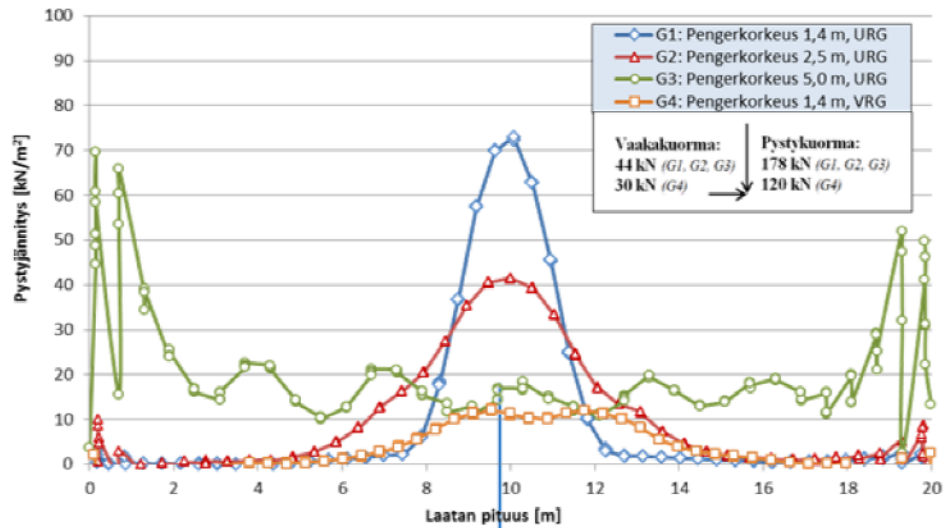


Kuva 8.17 Pistekuorman aikaansaama pystyjännitys suoraan kuormituspisteen alla. Tuloksissa on mukana jarrutuskuorma, joka ei vaikuttanut pystyjännitysten suuruuteen.

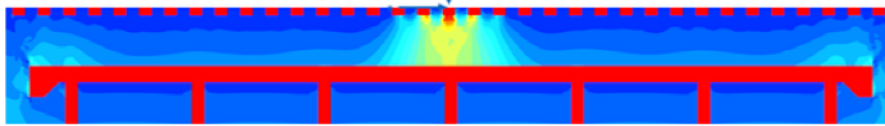
Kuva 8.18

(Kappale o Kappale 8.3.2 )

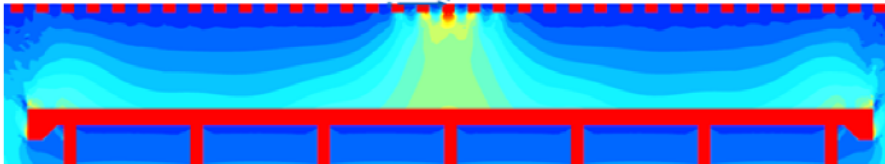
Pystyjännitys  $\sigma_{yy}$  pengerlaatan yläpinnassa pistekuorman vaikutuksesta



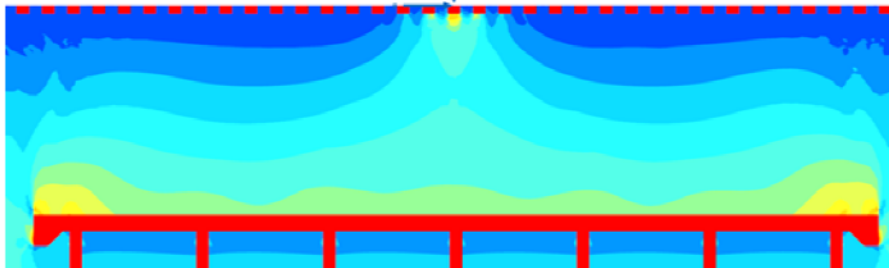
Geometria 1a/1b



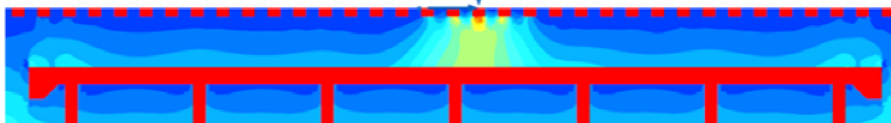
Geometria 2a/2b



Geometria 3a/3b



Geometria 4a/4b



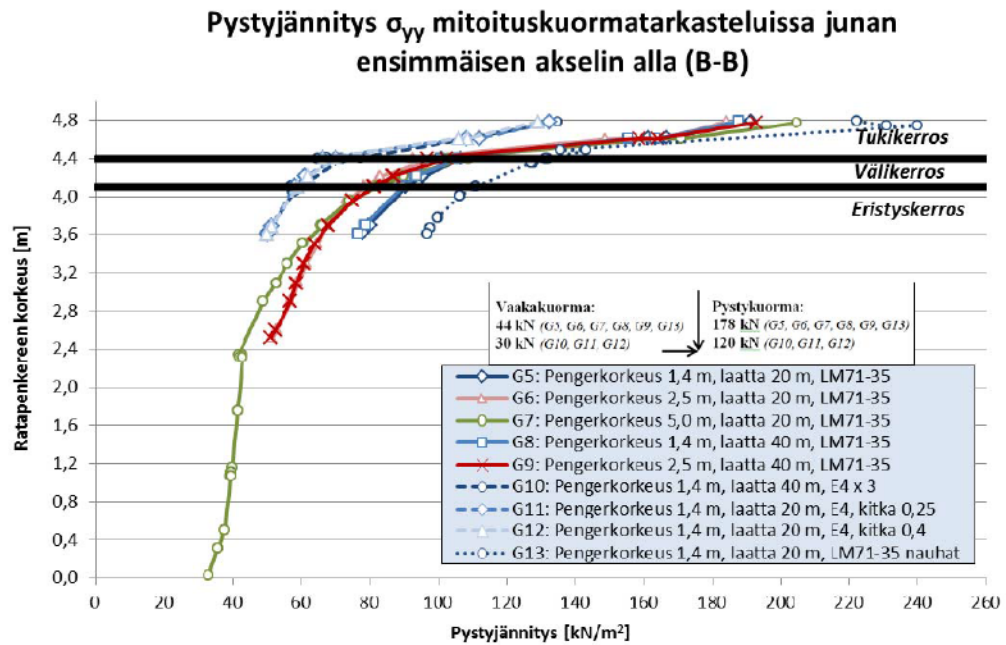
Kuva 8.18 Pistekuorman aikaansaama pystyjännitys pengerlaatan yläpinnan tasossa. Tuloksissa on mukana jarrutuskuorma, joka ei vaikuttanut pystyjännitysten suuruuteen.

(Kuva 8.19)

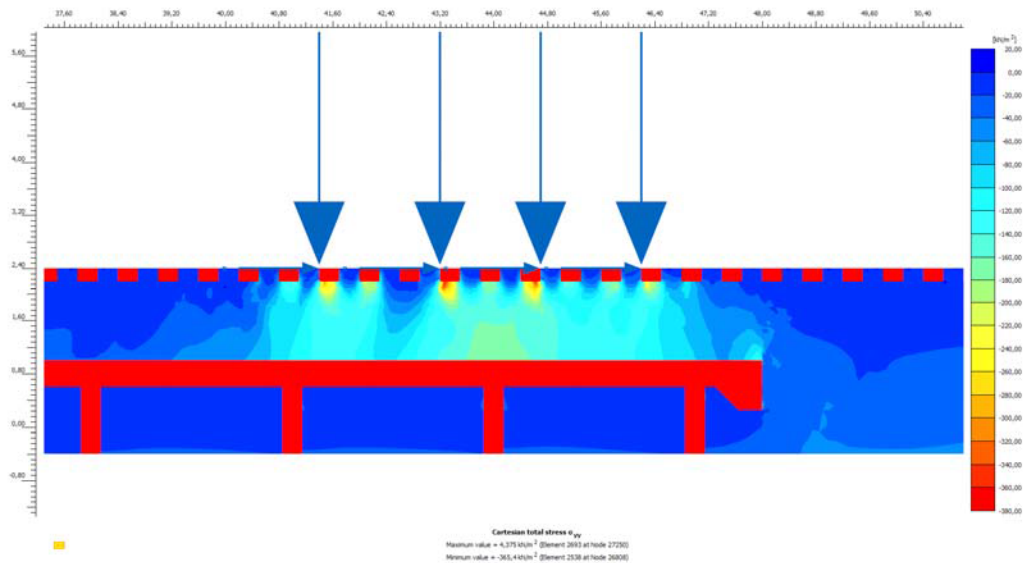
(Liite 3)

(Kuva 8.19)

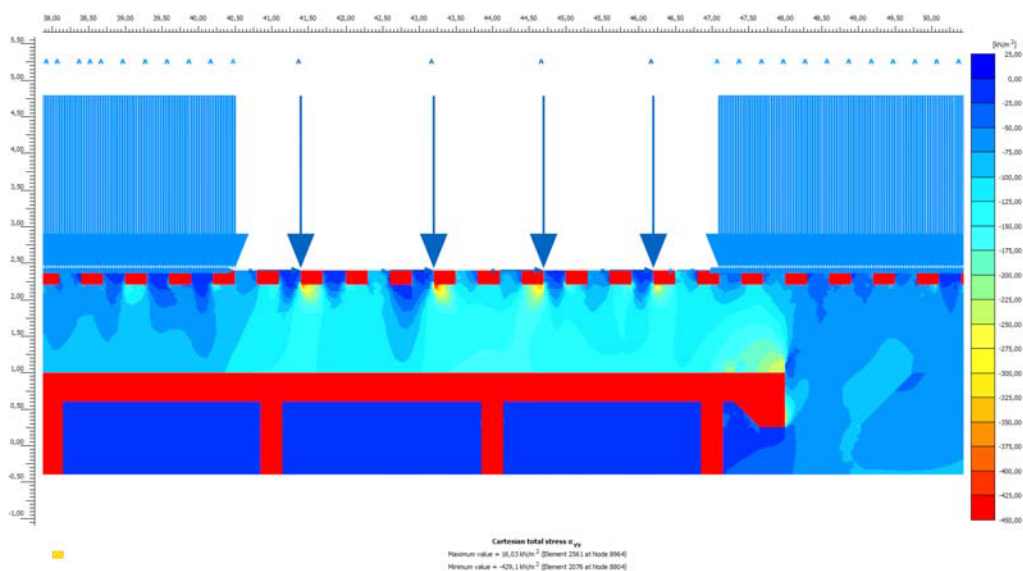
(Kuva 8.19, Kuva 8.20, Kuva 8.21)



Kuva 8.19 Mitoituskuormien aikaansaama pystyjännitys mittaussuoralla B-B. Jarutuskuorma ei vaikuttanut pystyjännitysten suuruuteen.



Kuva 8.20 Pystyjännitysjaakauma Geometriassa 5b (Vaihe 14). Skaala: o (sininen)...380 kPa (punainen).

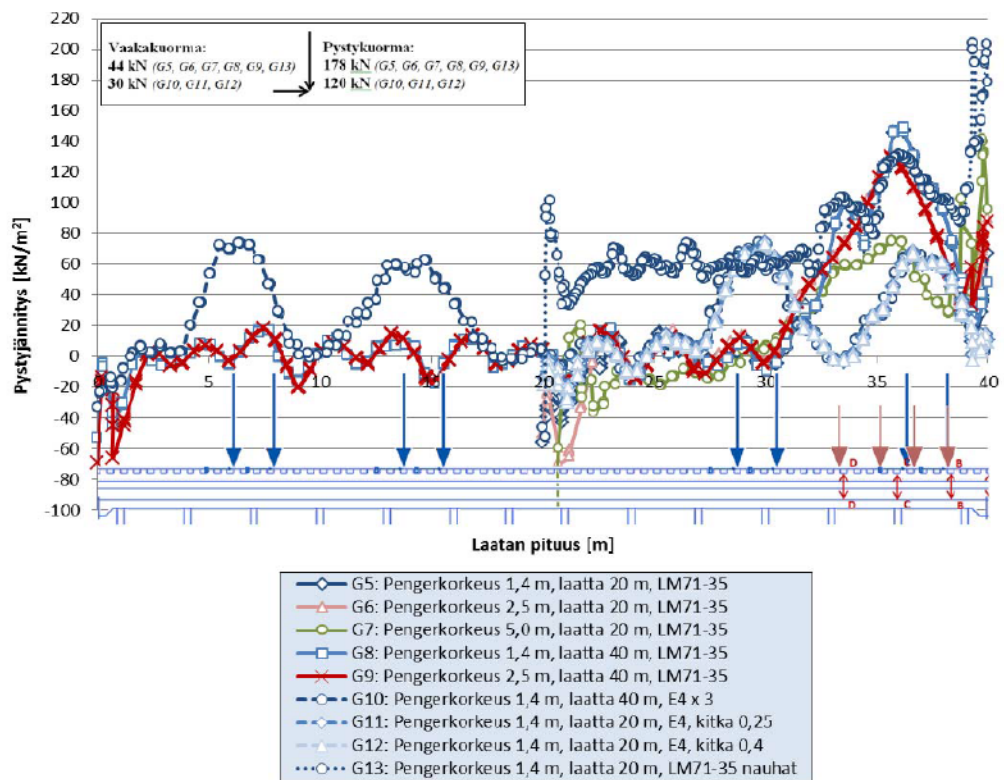


Kuva 8.21 Pystyjännitysjaakauma Geometriassa 13b (Vaihe 14). Skaala: o (sininen)...450 kPa (punainen).

Kuva 8.22

Kuva (8.22)

**Pystyjännitys  $\sigma_{yy}$  pengerlaatan yläpinnassa  
mitoituskuormatarkasteluissa (Vaihe 14)**



**Kuva 8.22** Mitoituskuormien aikaansaama pystyjännitys pengerlaatan yläpinnan tasossa. Jarrutuskuorma ei vaikuttanut pystyjännitysten suuruuteen.

**Kuva 8.22**

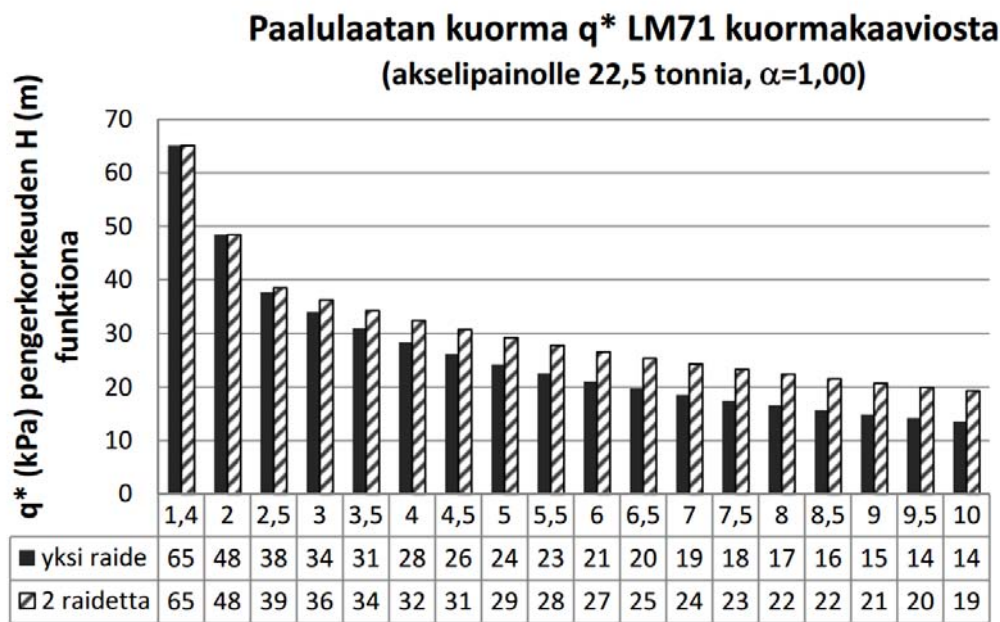
*Interface*

*Paalulaattojen*

*ja paaluhatturakenteiden suunnitteluohjeen  
(Kuva 8.23)*

mattava määrä. Suunnitteluohjeen diagrammissa kuormituksena on LM71-22,5:n akselipaino 250 kN, joka on kerrottu dynaamisella lisällä. Tämä vastaa tässä työssä tarkoin E4-kuormitusta (G10, G11, G12).

Tässä työssä E4-kuormituksilla saavutetaan pengerlaatan pinnalla 67–75 kPa:n pystyjännitystaso 1,4 m korkean penkereen kohdalla. Suunnitteluohjeen vastaava arvo on lähes sama, 65 kPa (Kuva 8.23). Tämän työn LM71-35-kuormitus on 1,48 kertaa korkeampi kuin E4-kuormitus, mutta pystyjännitys pengerlaatan pinnalla on noin kaksi kertaa suurempi.



Kuva 8.23 Liikennekuorman LM71-22,5 aiheuttama tasainen pystykuorma pengerkorkeuden funktiona [Liikennevirasto 2014c].

## 8.5 Vaakajännitys

### 8.5.1 Pistekuormat

Kirjallisuudesta ei löydy ohjearvoja sallituille vaakajännityksille rautatiesilloilla tai ratapenkereillä. Radan vaakasuunnassa tarkastellaan ensisijaisesti vaakasiirtymän raja-arvoja. Siten on mielekästä tarkastella työn vaakajännitystuloksia sen perusteella, kuinka suuri ulkoinen vaakakuorma on verrattuna suunnitteluohjeiden vaakakuormakaavoihin. NCCI1 [Liikennevirasto 2014a] määrittää siltojen suunnitteluperusteissa ominaisjarrukuormaksi:

$$Q_{lbk} = 20 \left[ \frac{\text{kN}}{\text{m}} \right] \times L_{a,b} [\text{m}] \leq 6000 \text{ kN} \quad (10.1)$$

jossa  $L_{a,b}$  on veto- ja jarrukuormien tarkasteltavan rakenneosan tarkastelupituus, jolla veto- tai jarrukuorman oletetaan vaikuttavan tasaisesti jakautuneena. Tässä tapauksessa  $L_{a,b} = 20$  m (pengerlaatan pituus). Koska rakennemallissa on mukana tukikerros, voidaan arvoa vähentää 50 % [Liikennevirasto 2014a]. Jotta kuorma-arvo ottaa huomioon Plaxis 2D -ohjelman rajatun laskenta-avaruuden, jaetaan kuorma-arvo vielä

ratapölkyn leveydellä (2,6 m) niin kuin työssä on tehty kaikkien kuormitusten kohdalla (*Kappale 6.5.2*). NCCI:n mukaan jarrutuksesta aiheutuu 20 m pitkälle betoni-laatalle tukikerroksen alla seuraava kokonaisvaakakuorma, kun se on skaalattu 2D-avaruuteen:

$$Q_{lbk} = \frac{20 \left[ \frac{\text{kN}}{\text{m}} \right] \times 20 \text{ m} \times 0,5}{2,6 \text{ m}} = 77 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad (10.2)$$

Vertailulähtökohtana on siis, että vaakajännityksen aiheuttama kokonaisvaakakuorma pengerlaatan pinnalla olisi nykyisten suunnitteluohjeiden mukaan 77 kN/m, kun pengerlaatta on 20 m pitkä, ja 154 kN/m, kun pengerlaatta on 40 m pitkä. Maksimivaakakuorma saa olla 2300 kN/m, joka saadaan jakamalla 6000 kN ratapölkyn leveydellä. Pengerlaatan yläpinnan tason vaakajännitystuloksien avulla pääsee parhaiten käsiksi tähän vertailuun.

Kuvaajassa (*Kuva 8.24*) on hyvä huomioida vaakajännitysten eri lähtötasot. Uuden radan geometrioissa (G1, G2, G3) jarrukuorma on 44 kN ja tuloksena maksimi-vaakajännitys ratapölkyn alapinnan tasossa on 58–62 kN/m<sup>2</sup>. Vanhan radan geometriassa (G4) jarrukuorma on 30 kN ja maksimivaakajännitys ratapölkyn alapinnan tasossa on 39 kN/m<sup>2</sup>. Jarrukuorman osuus vaakajännityksestä on kuitenkin mitättömän pieni. Pystysuuntainen junakuorma määrää lähes kokonaisuudessaan vaakajännitysjakauman (*Liite 4*). Radan rakenteiden oman painon vaikutus on poistettu tuloksista (*Kappale 6.5.4*). Kuvaaja (*Kuva 8.24*) esittää vaakajännityksen maksimia pengerlaattalla, koska vaakajännitys on keskittynyt suoraan pistekuorman alapuolelle matalilla penkereillä (esimerkiksi *Kuva 8.25*).

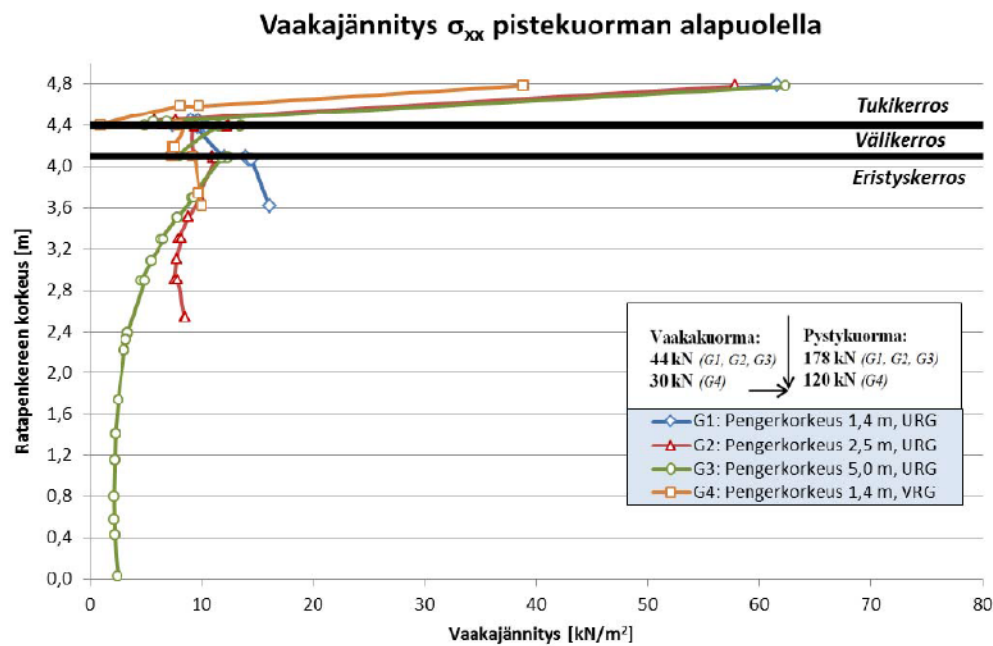
Kuvaaja (*Kuva 8.26*) osoittaa, kuinka vaakajännitys jakautuu pengerlaatan yläpinnan tasossa. Huippuarvot nähdään suoraan pistekuormien alapuolella. Mitä korkeampi ratapenger on, sitä leveämmälle alalle vaakajännitys luonnollisesti jakautuu. Matalilla ratapenkereillä huippuarvo jää pienemmäksi, mutta vaakajännityksen aiheuttama kokonaisvaakavoima pengerlaatan pinnalla säilyy samansuuruisena samassa ulkoisessa kuormitustilassa (G1, G2, G3).

Pengerlaattaan vaikuttava kokonaisvaakavoima voidaan arvioida käyrien alle jäävästä pinta-alasta (*Kuva 8.26*): Jaetaan käyrien alla oleva pinta-ala osiin. Kerrotaan keskimääräiset vaakajännitysarvot [kN/m<sup>2</sup>] pengerlaatan pituudella [m] ja mallin leveydellä [1 m]. Pengerlaattaan vaikuttavat vaakavoimat ovat karkeasti:

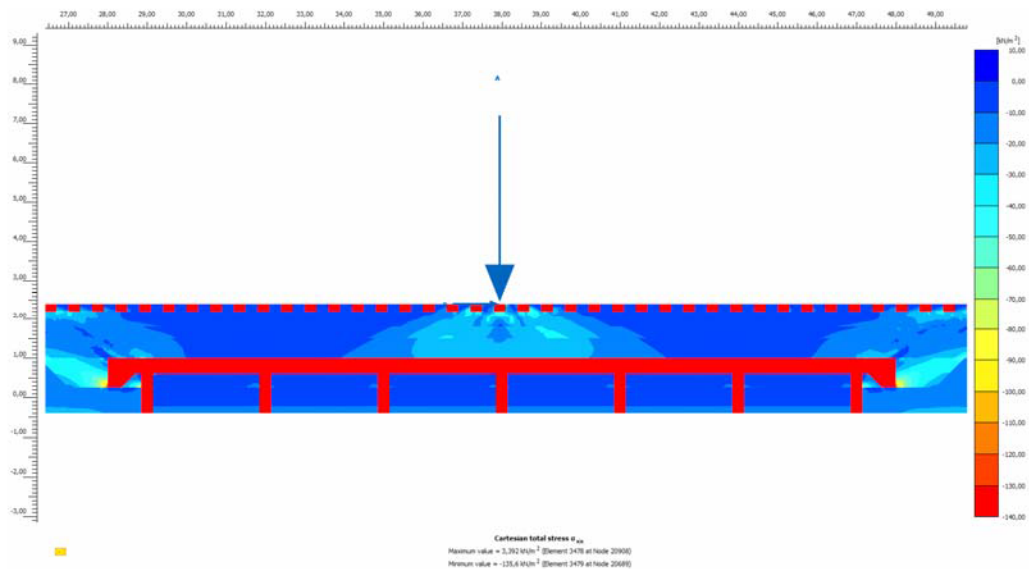
- G1: **120 kN**
- G2: **100 kN**
- G3: **130 kN** (päätypiikit jätetty huomioimatta)
- G4: **70 kN**

Arvion epätarkkuuden takia voidaan olettaa, että uuden radan geometrian tarkasteluissa (G1, G2, G3) vaakakuorma on käytännössä sama. Vanhan radan geometriassa (G4), jossa on käytetty todellista junakuormaa vastaavaa matalampaa kuormitustasoa, vaakakuorma on odotetusti myös matalampi. Ulkoisella vaakakuormalla ei ole vaikutusta tuloksiin, vaan käytännössä kaikki vaakajännitys on suoraan ulkoisen pystykuorman aikaansaamaa (*Liite 8*).





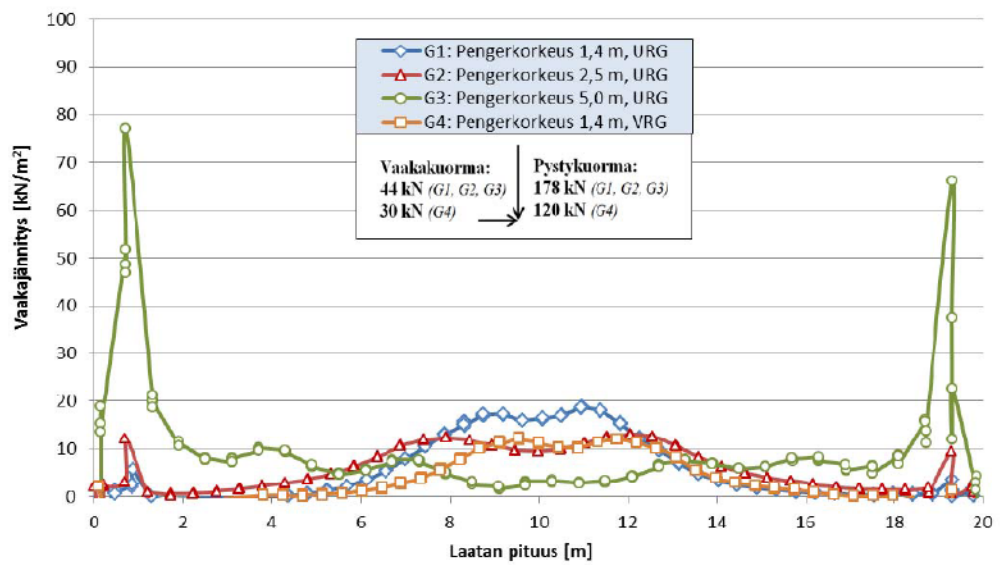
**Kuva 8.24** Pistekuorman aikaansaama vaakajännitys suoraan kuormituspisteen alla. Tuloksissa on mukana jarrutuskuorma, joka ei vaikuttanut vaakajännitysten suuruuteen.



**Kuva 8.25** Vaakajännitysjauma Geometriassa 1. Skaala: 0 (sininen)...140 kPa (punainen).



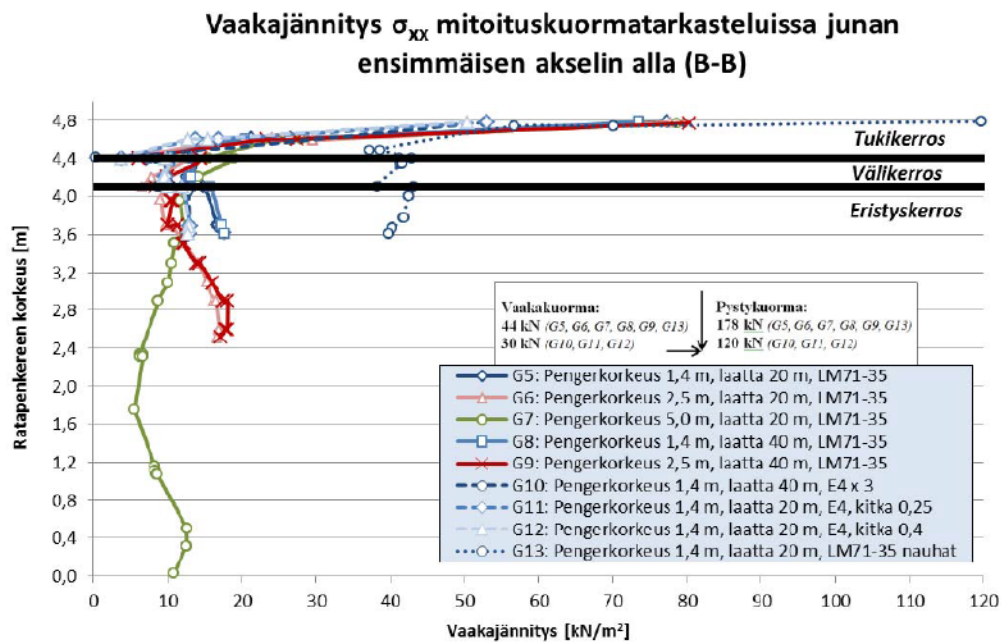
### Vaakajännitys $\sigma_{xx}$ pengerlaatan yläpinnassa pistekuorman vaikutuksesta



Kuva 8.26 Pistekuorman aikaansaama vaakajännitys pengerlaatan yläpinnan tasossa. Tuloksissa on mukana jarrutuskuorma, joka ei vaikuttanut vaakajännitysten suuruuteen.

(Kuva 8.27)

(Kuva 8.27)



Kuva 8.27 Mitoituskuormien aikaansaama vaakajännitys mittaussuoralla B-B. Jarutuskuorma ei vaikuttanut vaakajännitysten suuruuteen.

(Kuva 8.27)

Kuva

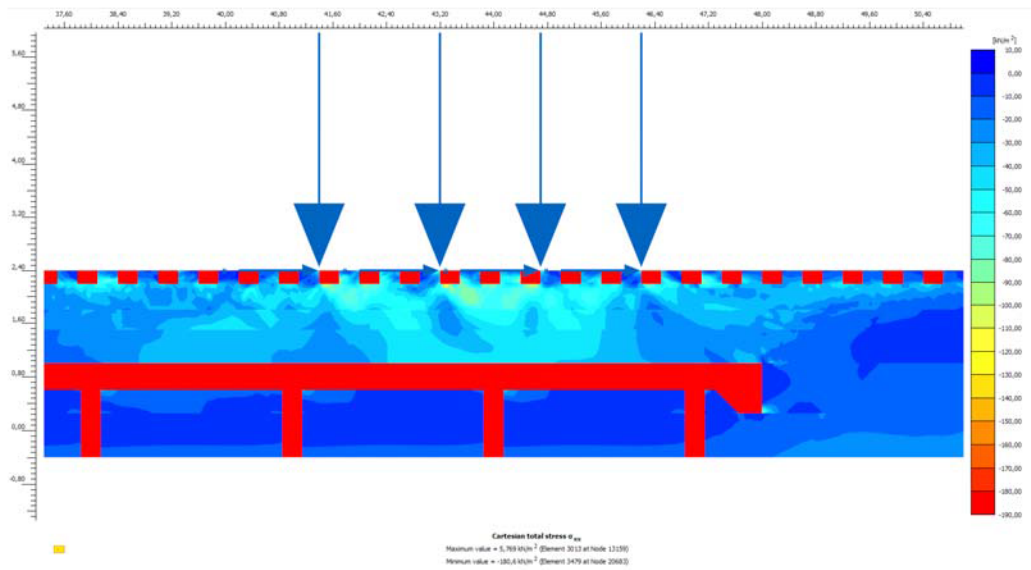
8.28, Kuva 8.29

Kuva 8.30

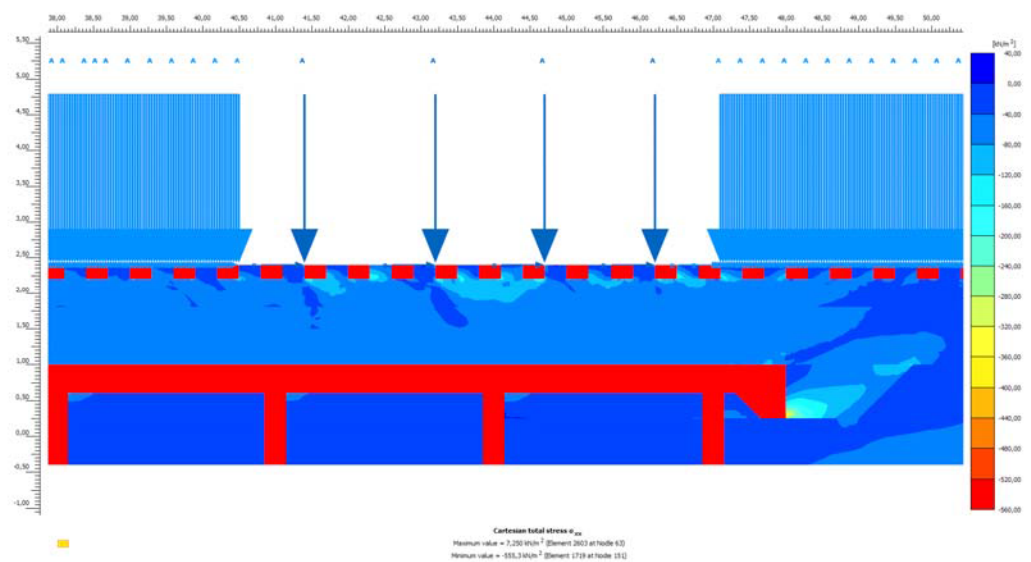
(Liite 8)

(Kappale o)

Interface

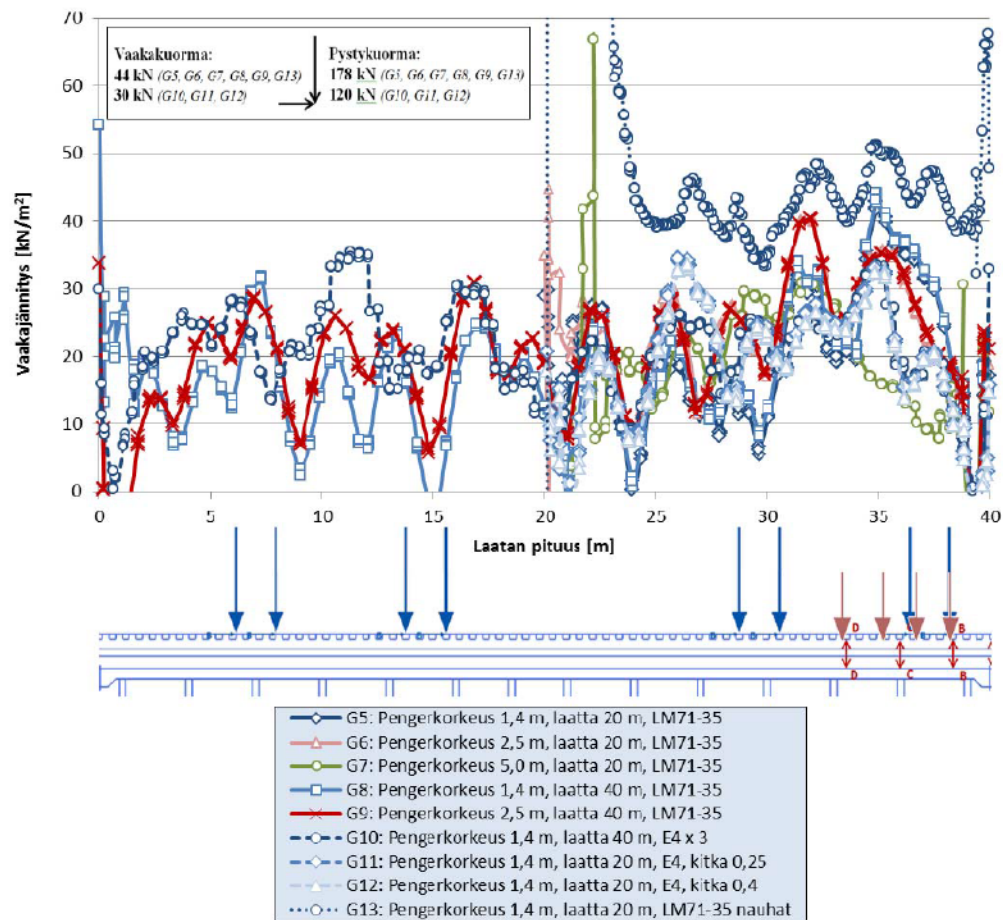


Kuva 8.28 Vaakajännitys jakauma Geometriassa 5 (Vaihe 14). Skaala: 0 (sininen)...190 kPa (punainen).



Kuva 8.29 Vaakajännitys jakauma Geometriassa 13 (Vaihe 14). Skaala: 0 (sininen)...560 kPa (punainen).

**Vaakajännitys  $\sigma_{xx}$  pengerlaatan yläpinnassa  
mitoituskuormatarkasteluissa (Vaihe 14)**



**Kuva 8.30** Mitoituskuormien aikaansaama vaakajännitys pengerlaatan yläpinnan tasossa – tulokset jarrutustarkastelusta. Jarrutuskuorma ei vaikuttanut vaakajännitysten suuruuteen merkittävästi nauhakuormattomissa tarkastelutapauksissa (Liite 8).

**Kuva 8.30**

NCCI1 määrittää ominaisjarrukuorman ratasilloilla Kaavalla 10.1, joka on esitetty aikaisemmin (Kappale 8.5.1). Tämän työn tulosten perusteella voidaan määrittää suuntaa-antava kaava penglerlaattaan vaikuttavalle vaakavoimalle ratapenkereellä, kun mitoituksessa käytetään ainoastaan pistemäisiä akselikuormia:

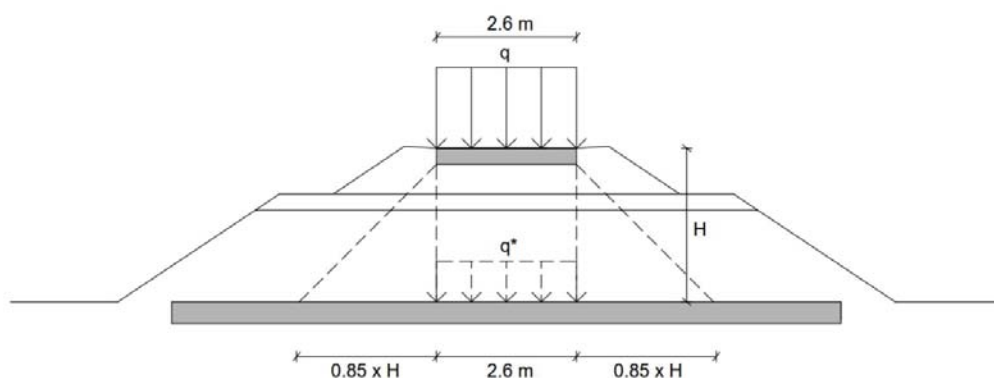
$$Q_{ldk,p} = 50 \left[ \frac{\text{kN}}{\text{m}} \right] \times L_{a,b} [\text{m}] \quad (10.3)$$

Kun käytetään kuormituskaavion LM71 mukaisia piste- ja nauhakuormia, penglerlaattaan vaikuttava vaakavoima ratapenkereellä on:

$$Q_{ldk,n} = 100 \left[ \frac{\text{kN}}{\text{m}} \right] \times L_{a,b} [\text{m}] \quad (10.4)$$

jossa  $L_{a,b}$  on penglerlaatan pituus. Sama kaava pätee sekä junan ohiajossa että jarrutuksessa. Tämän työn tulosten perusteella sama kaava pätee myös pengerkorkeudesta, penglerlaatan pituudesta, junan pituudesta ja kuormasta riippumatta.

Kaavojen voidaan olettaa antavan hyvin konservatiiviset tulokset eli ehdottomat maksimiarvot vaakakuormalle johtuen jännitystuloksien tulkinnasta ja mallinnusohjelman kaksiulotteisen avaruuden rajoitteista (Kuva 8.31). Kaavat on johdettu viimeisen kuormitusvaiheen (vaihe 14) vaakajännityskuvaajasta. Juna on penglerlaatan oikeassa ääripäässä ja vaakajännitysten voidaan siten olettaa olevan samansuuntaisia penglerlaatan pinnalla. Kun juna yhdessä aikaisemmassa kuormitusvaiheessa on penglerlaatan vasemmassa ääripäässä, vaakajännitys ja vaakavoima voidaan olettaa olevan samansuuruinen, mutta erisuuntainen. Keskellä penglerlaattaa juna ei aiheuta nettovaakavoimaa penglerlaattaan. Määritetyt kaavat esittävät näin ollen skalaariarvoa (ei suuntaa) maksimivaakakuormalle.



Kuva 8.31 Työssä määritetyt vaakavoimakaavat vaikuttavat ainoastaan ratapölkyn leveydellä penglerlaatan pinnalla.

## 8.6 Pengerlaatan alustaluku

Vaakakuormitettua pengerlaattaa tarkastellaan usein kimmoteoriaan perustuvalla Winklerin mallilla, jossa maaperä on kuvattu vaakasuuntaisina jousina. Maapohja oletetaan lineaarisesti elastiseksi alustaksi, joka ei painu muualla kuin kuormitetulla alueella. Suunnittelussa maaperän jousien jäykkyys määritellään alustaluvuilla. Winklerin alusta toteuttaa pengerlaatan päässä yhtälön:

$$k_s = \frac{q}{s} \quad (10.5)$$

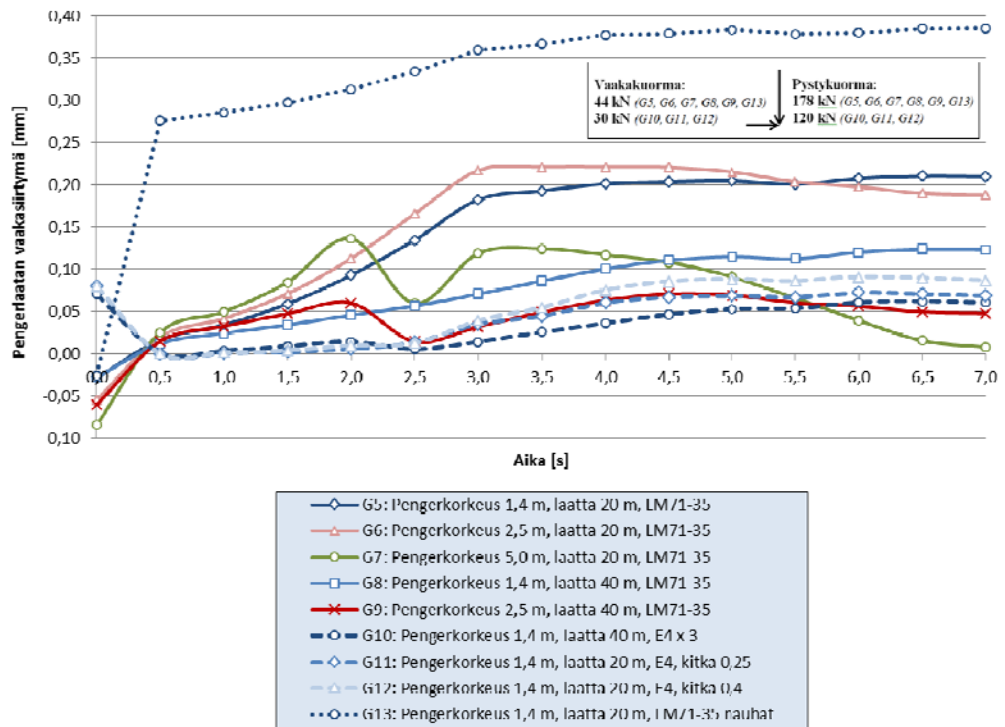
jossa  $k_s$  on alustaluku,  $q$  on vaakajännitys ja  $s$  on vaakasiirtymä. Jotta voidaan määrittää pengerlaatan jousivakion vaakasuuntainen alustaluku, tulee tuntea maaperän vaakajännitys ja vaakasiirtymä pengerlaatan oikeassa päädyssä.

Vaakasiirtymä määritetään pengerlaatan vaakasiirtymänä, koska maaperän realistisen vaakasiirtymän suora määrittäminen on mallinnusteknisistä syistä vaikeaa. Maaperän mallinnusverkko leukapalkin vieressä deformatuu epärealistisella tavalla sen mukaan kuinka pieneksi leukapalkin ja maaperän välinen kitka ( $R_{\text{inter}}$ ) asetetaan (*Kappale 0*). Mitattu vaakasiirtymä voi olla jopa negatiivista eli maan siirtymää leukapalkin sisään. Tästä syystä oletetaan, että pengerlaatan vaakasiirtymä on sama kuin maaperän vaakasiirtymä pengerlaatan päädyssä. Vaakasiirtymän mittauspiste rakennemallissa on keskellä pengerlaattaa suoraan oikeanpuoleisimman paalun yläpuolella. Tällä linjalla alapuolella oleva paalu tukee pengerlaattaa pystysuunnassa ja näin saadaan mahdollisimman tarkka vaakasiirtymäarvo.

Kuvaaja (*Kuva 8.32*) esittää pengerlaatan vaakasiirtymän ajan suhteen, kun juna jarruttaa. Kuvaajan siirtymät pätevät myös päädyssä olevaan maaperään. Tuloksista voi tehdä havaintoja rakennemallin osien vaikutussuhteista.

Kun pengerlaatta on pidempi (G5 vs G8, G6 vs G9), vaakasiirtymä on 2-3 kertaa pienempi. Muutosnopeuden taittuminen 3,0 sekunnin kohdalla osassa tarkastelutapauksia johtuu siitä, että juna saapuu 20 m pitkän pengerlaatan kohdalla tässä kuormitusvaiheessa (Vaihe 7) pengerlaatan päälle. Kun pengerlaatta on 40 m pitkä (G8, G9, G10), juna saapuu pengerlaatan päälle ajassa 1,0 s. Tämä kaikki tarkoittaa, että vaakasiirtymään vaikuttaa enemmän pengerlaatan päähän kohdistuva työntävä voima kuin pengerlaatan yläpinnan kitkavoima.

### Pengerlaatan vaakasiirtymä $u_x$ jarrutuksessa ajan funktiona

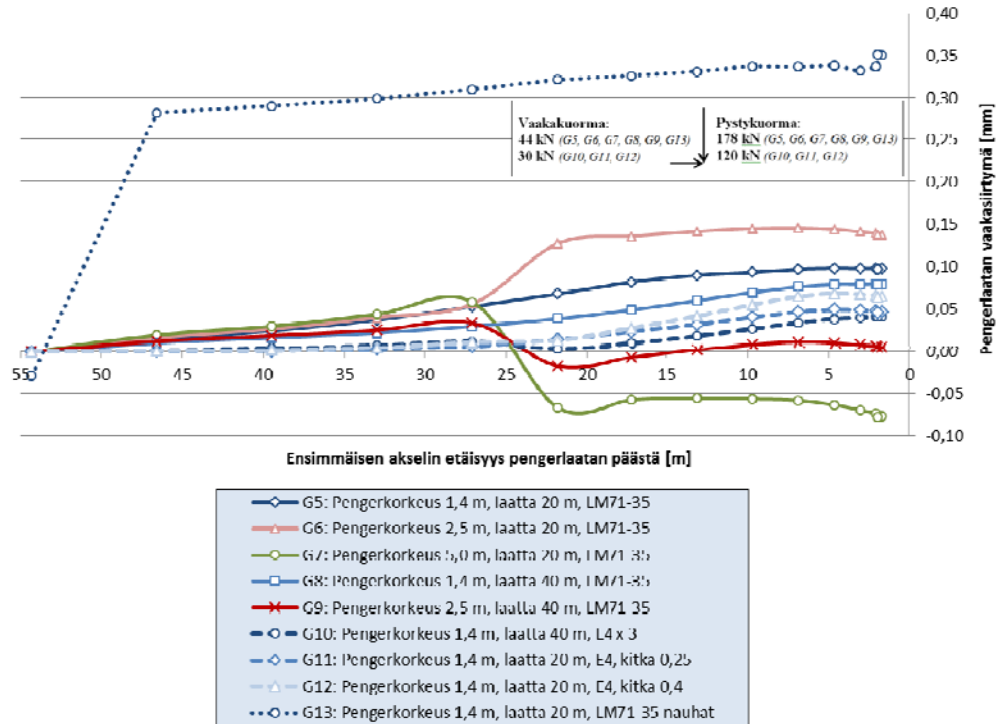


Kuva 8.32 Pengerlaatan kokonaisvaakasiirtymä ajan suhteen, kun juna jarruttaa. Siirtymän mittauspiste on pengerlaatan sisällä oikeanpuoleisimman paalun yläpuolella.

8.33) (Kuva

(Kuva 8.33)

**Jarrutuksen osuus pengerlaatan vaakasiirtymästä  $u_x$  junan sijainnin funktiona**

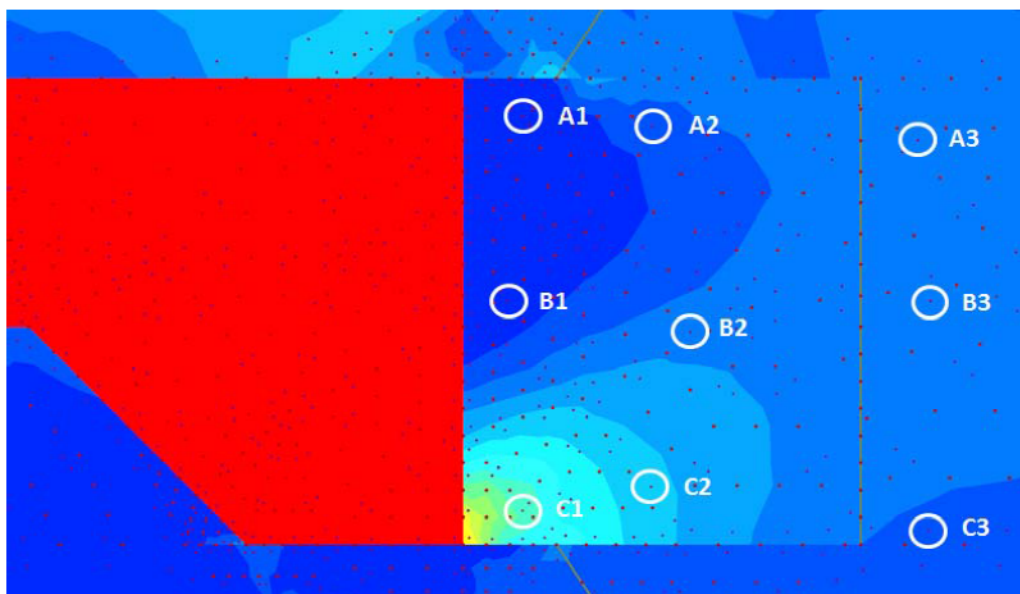


**Kuva 8.33** Junan jarrutuskuorman osuus pengerlaatan kokonaisvaakasiirtymästä junan liikkeen suhteen. Siirtymän mittauspiste on pengerlaatan sisällä oikeanpuoleisimman paalun yläpuolella.

(Kuva 8.34)

Kuva 8.35





Kuva 8.34 Vaakajännitysten mittauspisteet maaperässä alustaluvun määrittämiseksi. Kaikissa tarkastelutapauksissa vaakajännitys on suurempi leukapalkin alapuoliskolla, kuten kuvan esimerkissä.

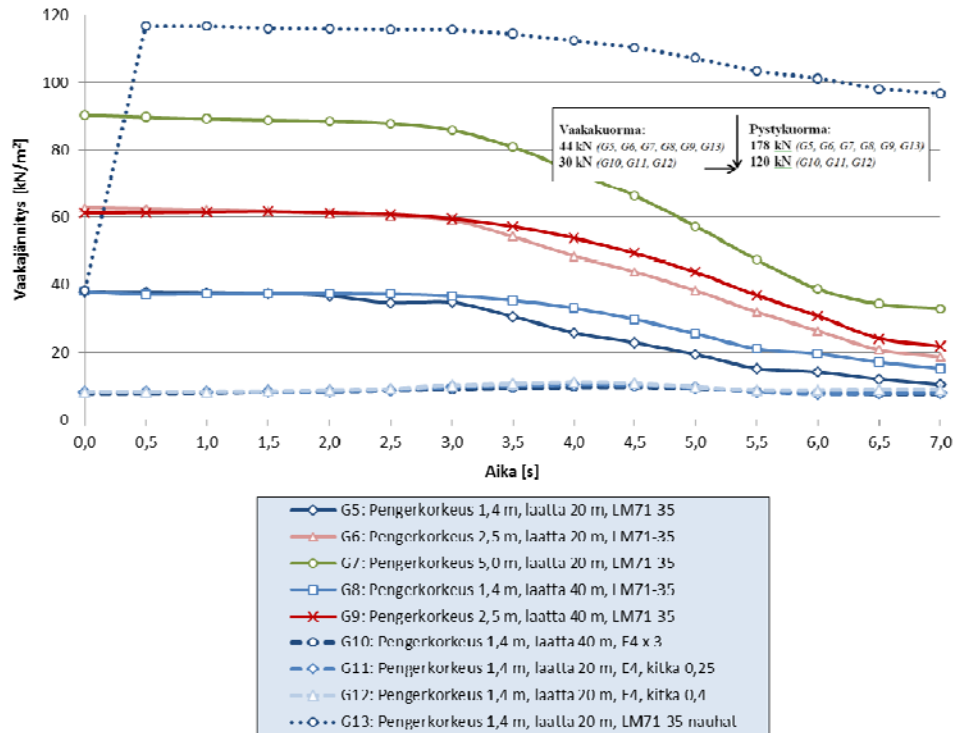
Kuva 8.35

(Kuva 8.32)

(Kuva 8.37)

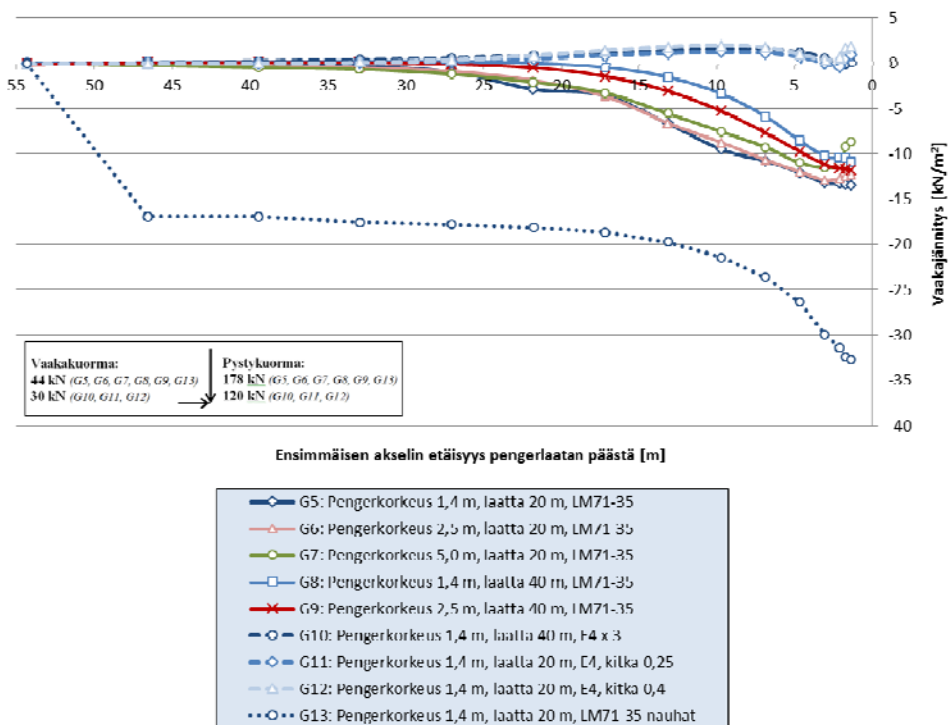
(Taulukko 8.4)

Pengerlaatan pään keskimääräinen vaakajännitys jarrutuksessa ajan funktiona

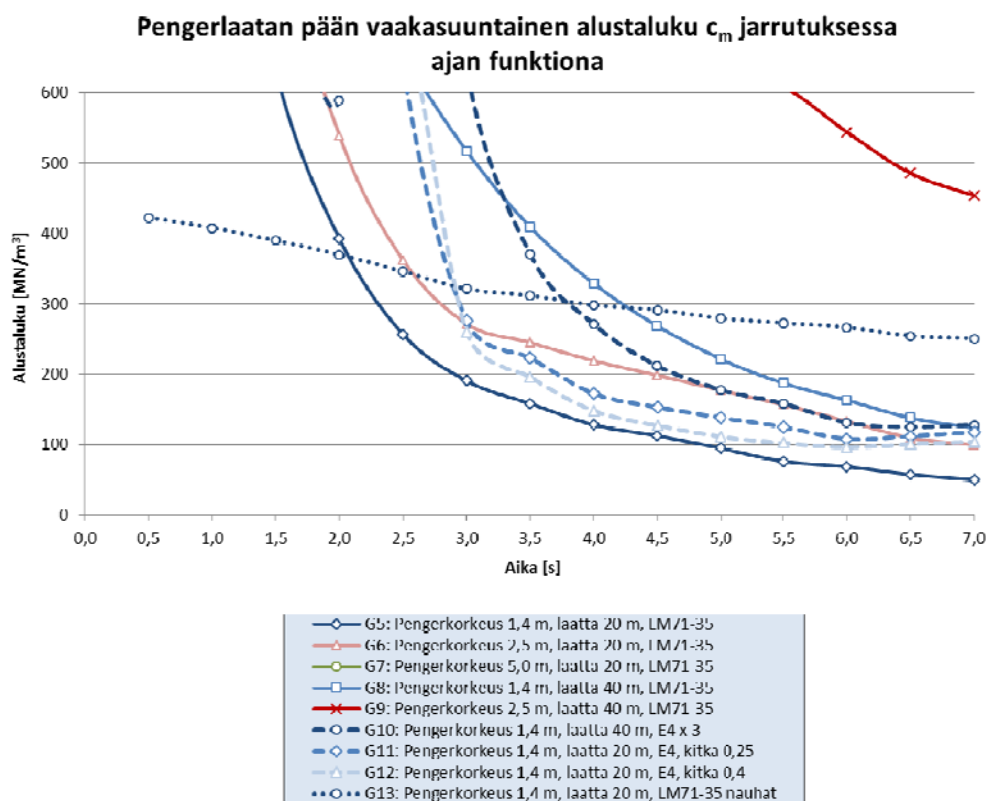


Kuva 8.35 Keskimääräinen vaakajännitys pohjamaassa pengerlaatan oikeassa päässä ajan suhteen, kun juna jarruttaa.

Jarrutuksen aiheuttama vähennys pengerlaatan pään keskimääräiseen vaakajännitykseen junan sijainnin funktiona



Kuva 8.36 Junan jarrutuksen aiheuttama vähennys keskimääräisessä vaakajännityksessä pengerlaatan oikeassa päässä junan liikkeen suhteen.



Kuva 8.37 Vaakasuuntainen alustaluku pengerlaatan oikeassa päädyssä, kun juna jarruttaa.

Taulukko 8.4 Pengerlaatan pään vaakasuuntainen alustaluku [MN/m<sup>3</sup>] viimeisen kuormitusvaiheen jälkeen (minimiarvo).

Geometria			

Arvo on jakauman minimiarvo ajanhetkeltä  $t = 4,5$  s, koska pengerlaatan erittäin pieni vaakasiirtymä (kts. Liite 11, 2/3) aiheuttaa epäjohdonmukaisen alustalukujakauman.

*(Kappale 6.5.3 )*

*Hardening soil*





*Paalulaattojen ja paaluhatturakenteiden suunnitteluoh-*  
*jeessa*

*Traction Électrique.*

*Wheel-Rail Contact.*

*Suunnitteluohje. TT- ja HTT-laattojen liitosten mitoitus onnettomuuskuormille 1-kerroksisissa rakennuksissa.*

*Plaxis 2D 2012. Part 2: Reference Manual.*

*Plaxis 2D 2012. Part 3: Material Models Manual.*

*Multiscale simulation of dry friction in wheel/rail contact.*

*Train Braking*

*Suomen veturit osa 2. Moottorikalusto.*

*Improved Knowledge of CWR Track*

*Modern Railway Track*

*Wheel slip due to leaf contamination.*

*Contact stress distribution on elliptical contact surfaces subjected to radial and tangential forces.*

*Recent Development in COF Measurements at the Rail/Wheel Interface*

*Guidelines to best practices for heavy haul railway operations: Wheel and rail interface issues.*

*Shear Behaviour of Railway Ballast based on Large Scale Triaxial Testing*



alueet.

*Osa 1, Väylät ja*

alueet.

*Osa 1, Väylät ja*

port.

*Under Sleeper Pads – Summarising Re-*

*A review of track design procedures, Vol. 2, Sleepers and Ballast, Railways of Australia*

*Laboratory measurements of dynamic properties of rail pads under incremental preload.*

*Rolling with slip and spin in the presence of dry friction*

*eristys- ja välikerrosten tiiviys- ja kantavuustutkimus*

*Radan*

*teen kuormituskestävyys.*

*Radan 3D-rakennemalli ja rataraken-*

*teen kuormituskestävyys*

*Radan 3D-rakennemalli ja rataraken-*

*Uuden, vihreän värityksen saanut Pendolino Helsingin päärautatieasemalla.*

*Veturi numero 3202 Tampereella juhannuksena 2012.*

*Ratakiskon elinkaari*

*Raiteen pituus- ja poikittaissuuntaisen vastuksen määrittäminen. Kokeellinen tutkimus, Mellilän ratapiha*

*Akselipainon noston tekniset edellytykset ja niiden soveltuminen Luumäki-Imatra-rataosuudelle*

*Muokkaustekniikan perusteet.*

*Sitomattomien kerrosten kiviainesten muodonmuutosominaisuudet.*

*Radan tukikerroksen ja alusrakenteen kirjallisuustutkimus, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot.*

*Effect of steepness of side-slope on rutting.*

*Effect of the spring and overload on the rutting of a low-volume road.*

*Modeling of Soil-Structure Interaction between Railway Bridge and Soil*

*Paalulaattarakenteiden suunnittelu*

*Ratatekniset ohjeet (RATO). Osa 2 Radan geometria*

*Suurimmat sallitut akselipainot.*

*Rataan kohdistuva kuormitus liikkuvan kaluston ja radan vuorovaikutuksessa.*

*Eurokoodin soveltamisohje. Geotekninen suunnittelu – NCCI 7*

*Ratatekniset ohjeet (RATO). Osa 4 Vaihteet.*

*Rautateiden verkkoselostus 2015.*

*Eurokoodin soveltamisohje. Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet – NCCI 1*

*Ratatekniset ohjeet (RATO). Osa 3 Radan rakenteet.*

*Paalulaattojen ja paaluhatturakenteiden suunnitteluohje*

*Muovikomposiittiputken soveltuminen tierummaksi ja silloiksi Suomen oloihin*

*Murskatun kalliokiviaineksen hienoneminen ja routivuus radan rakennekerroksissa.*

*Wear, friction and plastic deformation of two rail steels – full scale test and laboratory study.*

*Tribology of the Wheel-Rail Contact.*

*Parmalta 5. miljoonas ratapölkky, Betoni on korvannut puun rautateillä*

*Radan pystysuuntainen jäykkyys ja sen mittaaminen.*

*An Introduction to Solid Mechanics.*

*Friction coefficient in rail-wheel contacts as a function of material and loading parameters*

*Friction in Wheel-Rail Contacts.*

*European rail closer to silent braking technology.*

*Päällysrakennetöiden yleiset laatuvaatimukset PYL*

*Ratatekniset määräykset ja ohjeet (RAMO). Osa 1 Yleiset perusteet*

*Raidesepelin tekniset toimitusehdot.*

*Ratatekniset määräykset ja ohjeet (RAMO) Osa 11 Radan päällysrakenne*

*Oikorata Kerava – Lahti paalulaattojen suunnittelu- ja rakentamisohje*

*Standardin SFS-EN 13450 Raidesepeleikiviainekset – kansallinen soveltamisohje*

*Betoniratapölkkyjen tekniset toimitusehdot*

*Kehäradan kiintoraideselvitys*

*Maintaining Optimal Wheel and Rail Performance, Guidelines to Best Practice for Heavy Haul Railway Operations: Wheel and Rail Interface Issues.*

*Review of the effect of track stiffness on track performance*

*The hardening soil model: Formulation and verification.*

*Track Modulus: Its Meaning and Factors Influencing It.*

*Track geotechnology and substructure management.*

*Kiskoliikenne. Rata. Kiinnitysjärjestelmien vaatimukset. Osa 2: Betonisten ratapölkkyjen kiinnitysjärjestelmät*

*Vehicle Track Interaction: Identifying and Implementing Solutions.*

*A Study of Some Factors in Mechanistic Railway Track Design*

*Tietoa tiensuunnitteluun nro 73, ennakkotietoa uudesta tierakenteen mitoitusohjeesta*

*Sillansuunnittelun täydentävät ohjeet 2008.*

*Rataverkon luokittelun vertailu kantavuuden mukaan.*

*Track/bridge Interaction. Recommendations for calculations*

*Hornetin hydrauliiikaputkiston materiaalivevaihtoehtojen vertailu.*

*Eristyskerroksen materiaalin vaikutus maanvaraisen ratapenkereen toimivuuteen*

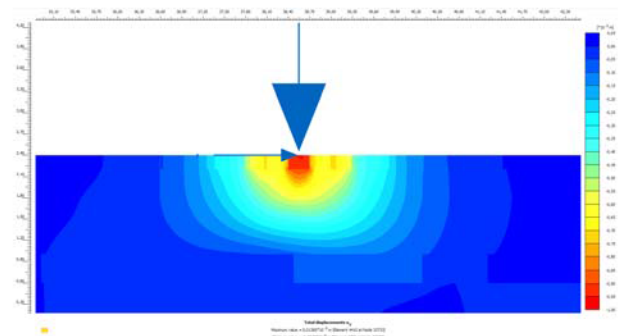
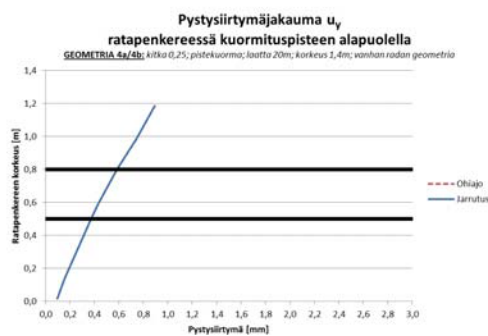
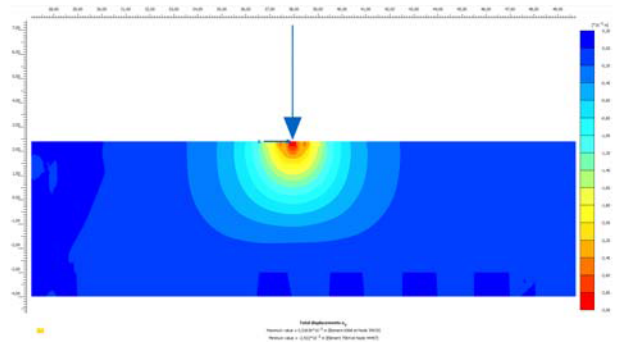
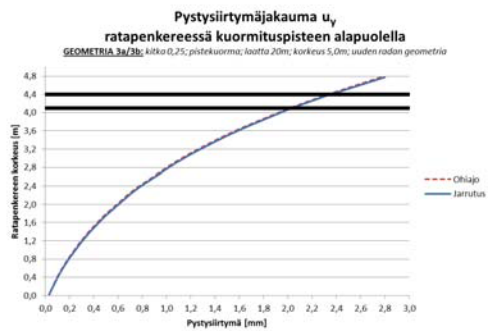
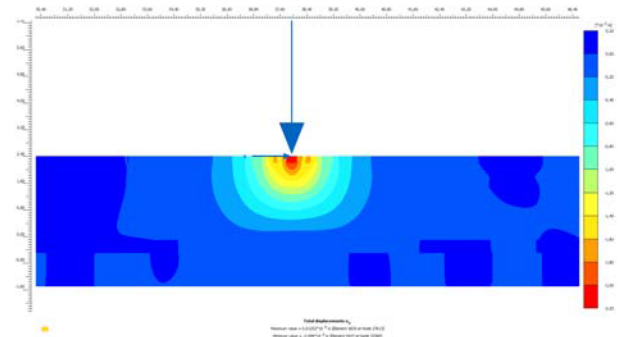
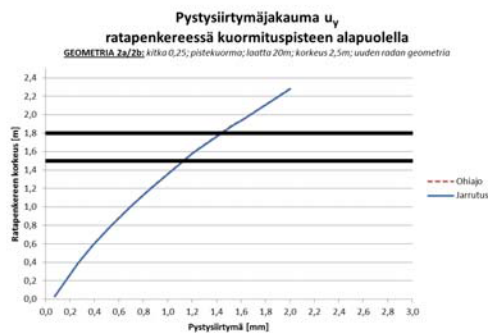
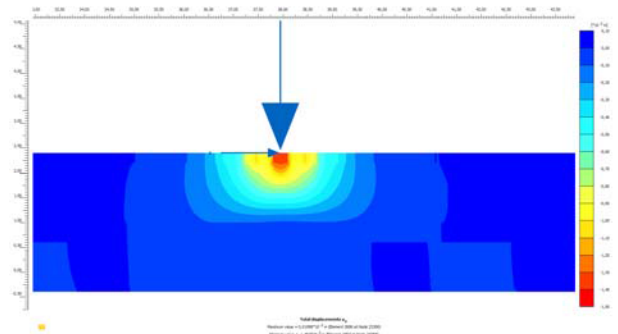
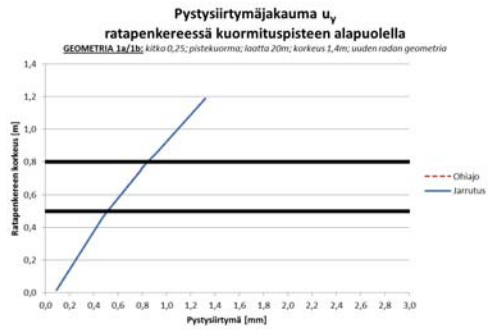
*Whistler by Rail.*

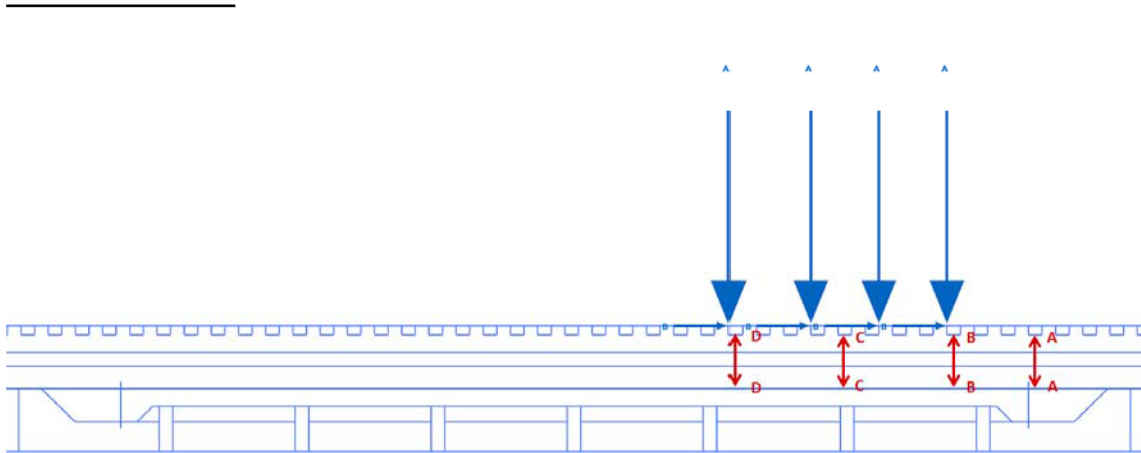
*The effects of local preload on the foundation stiffness and vertical vibration of railway track*

*Applicability of the Hertz contact theory to rail-wheel contact problems.*

*Finite Element Modeling of Prestressed Concrete Crossties with Ballast and Subgrade Support*



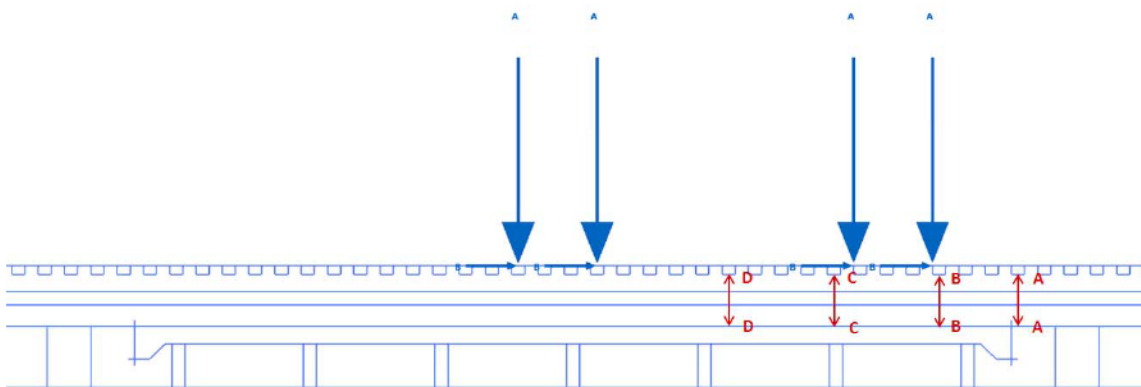




Poikkileikkaukset A-A, B-B, C-C ja D-D geometrioissa 5, 6, 7, 8, 9 ja 13.

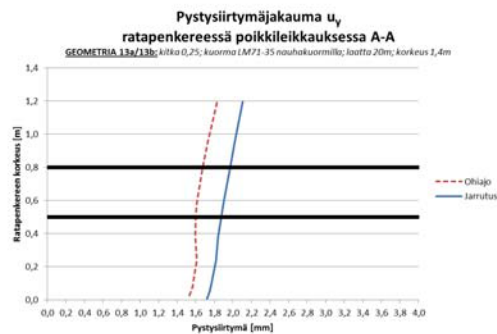
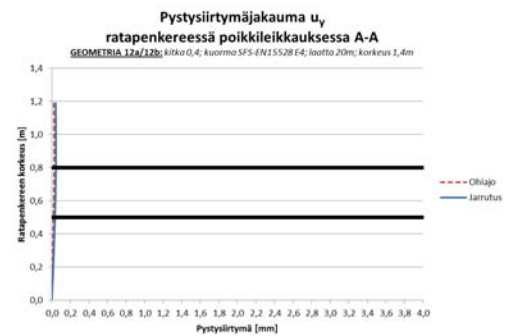
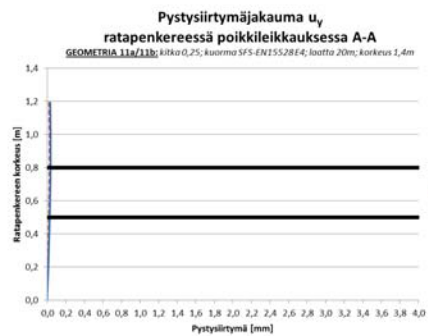
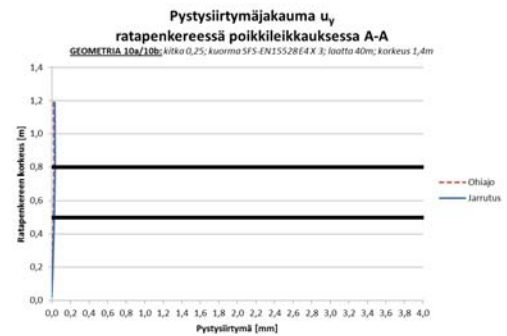
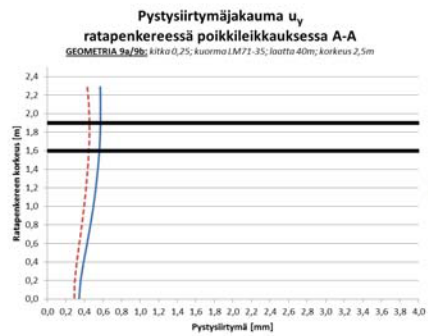
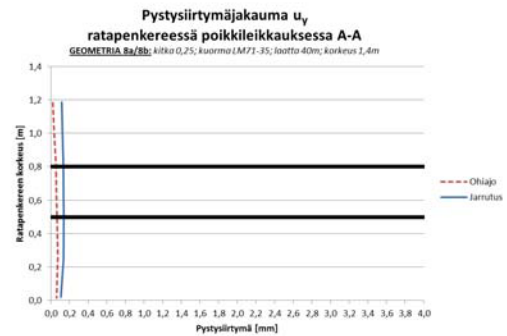
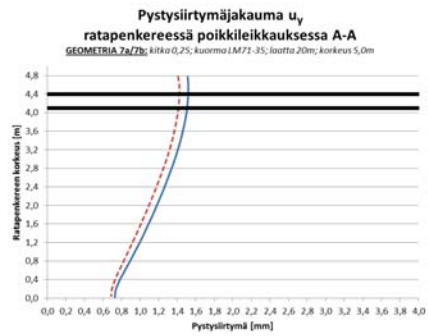
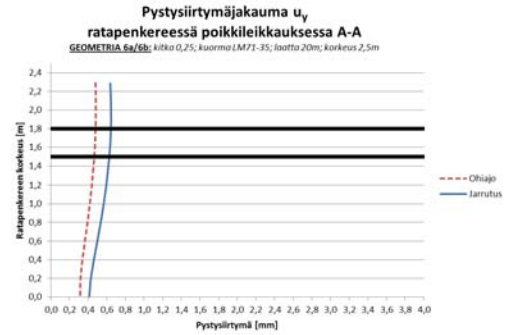
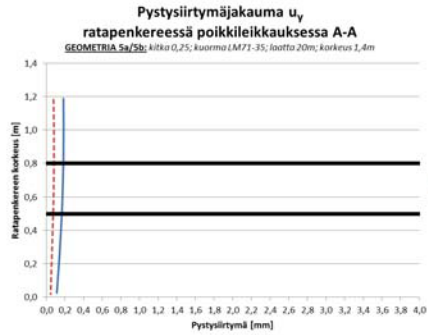


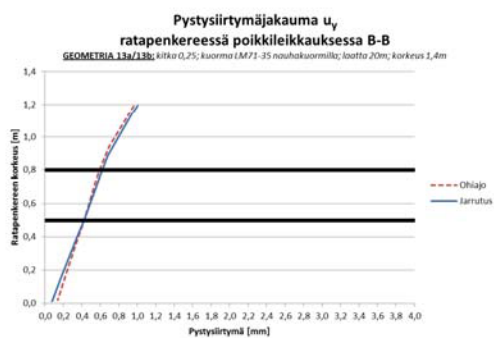
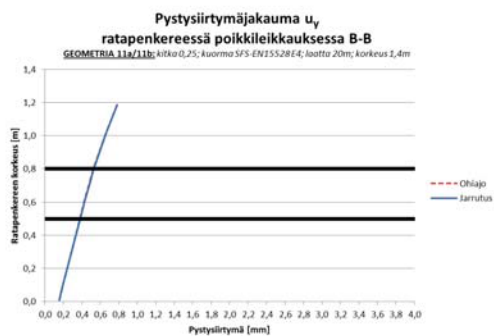
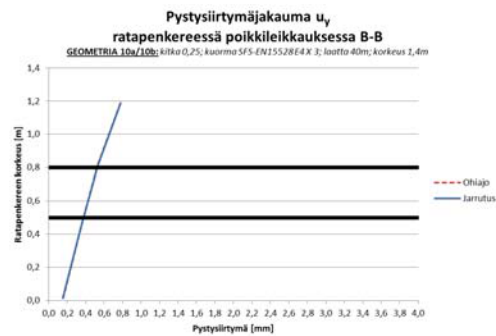
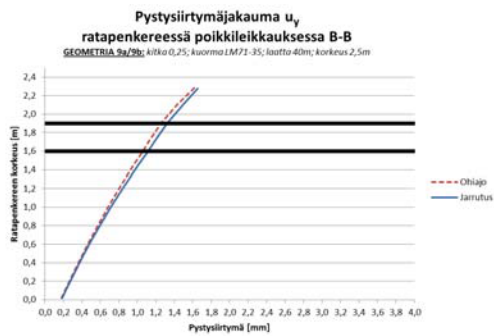
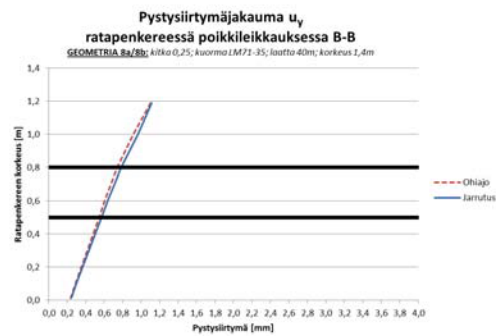
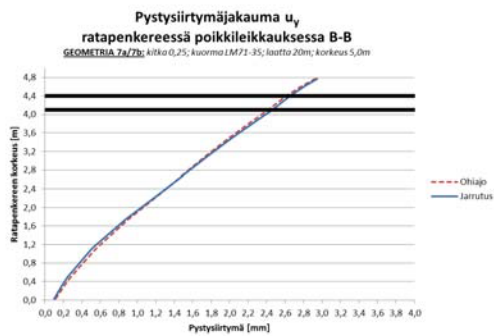
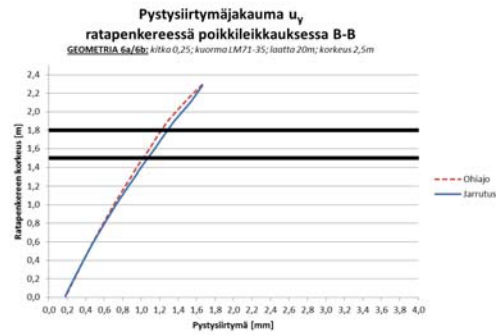
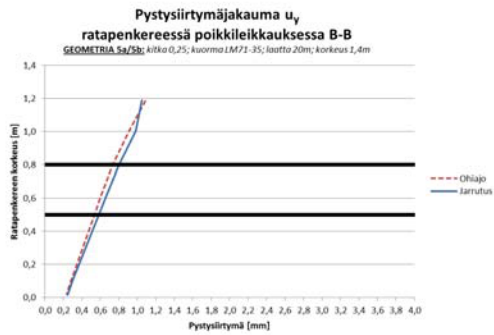
Poikkileikkaukset A-A, B-B, C-C ja D-D geometriassa 10.

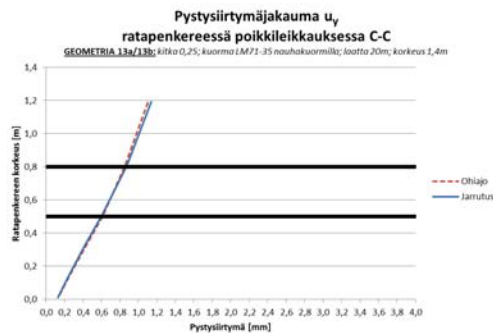
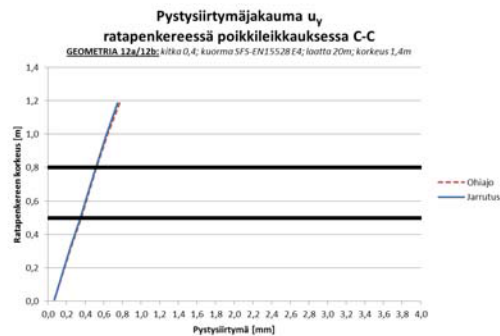
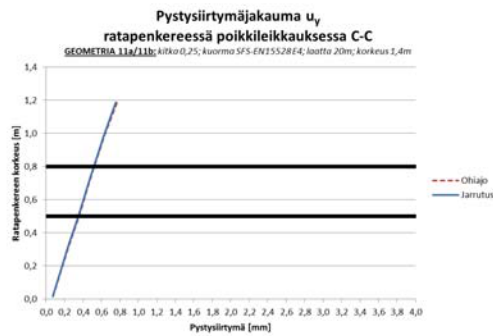
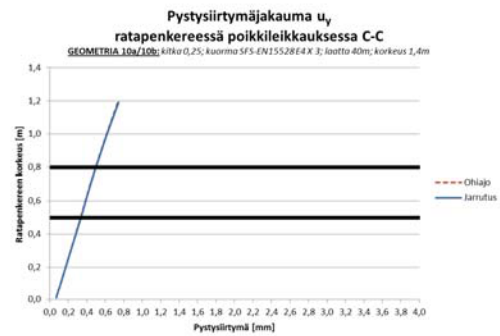
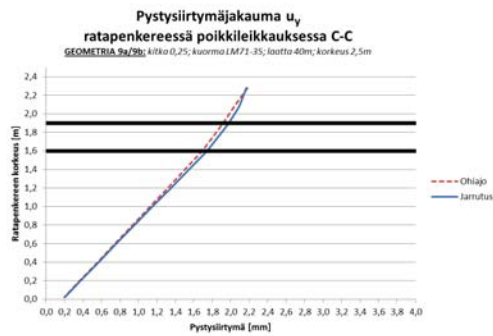
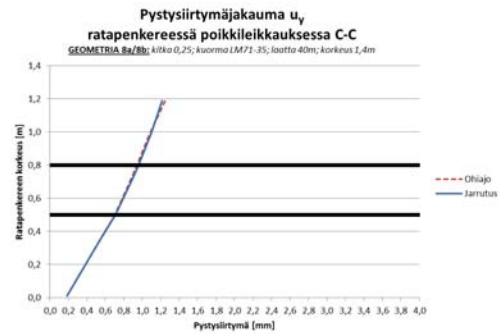
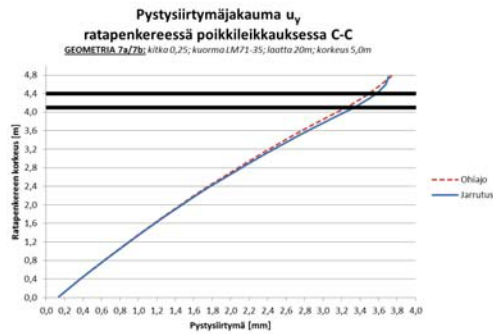
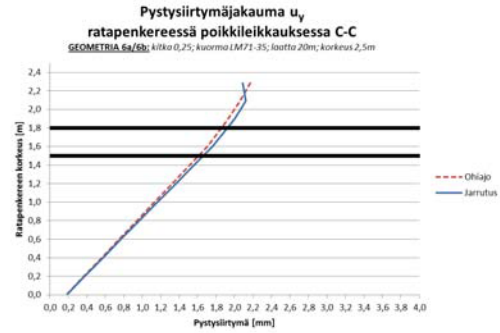
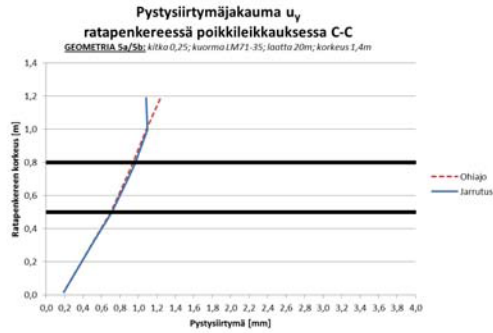


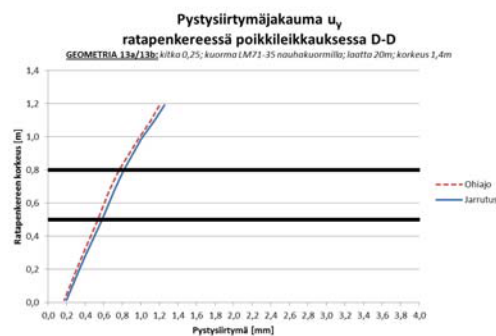
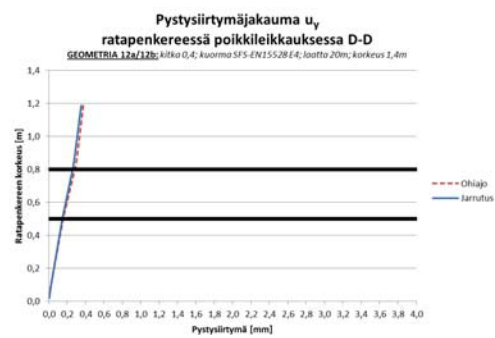
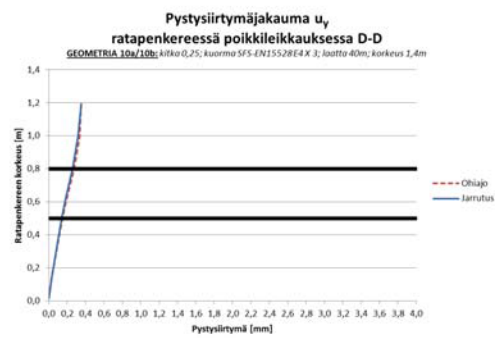
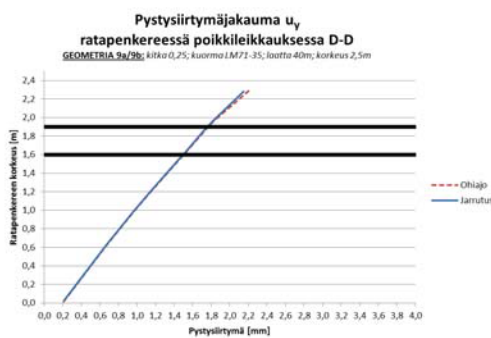
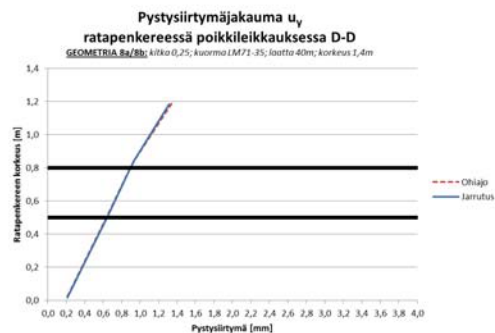
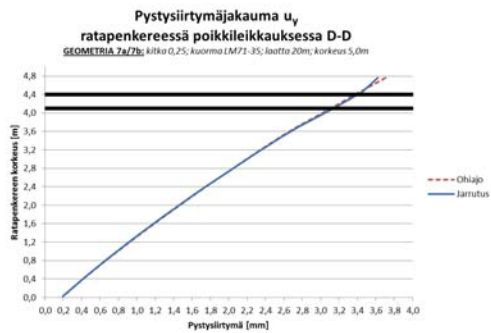
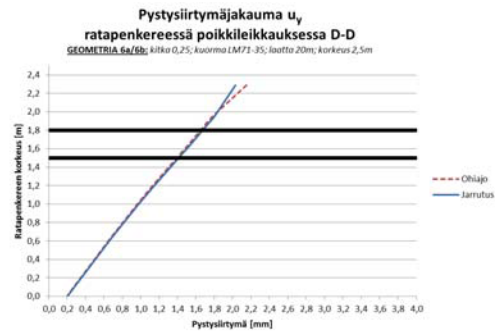
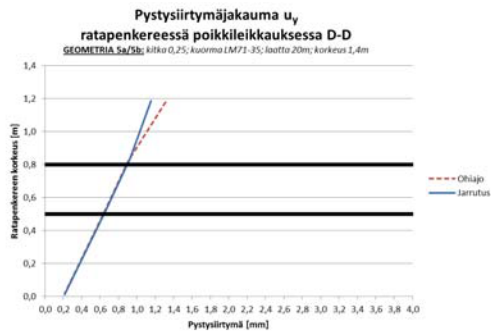
Poikkileikkaukset A-A, B-B, C-C ja D-D geometrioissa 11 ja 12.

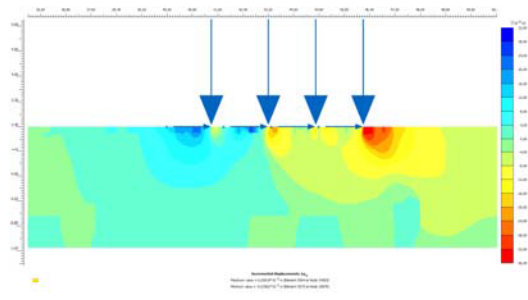
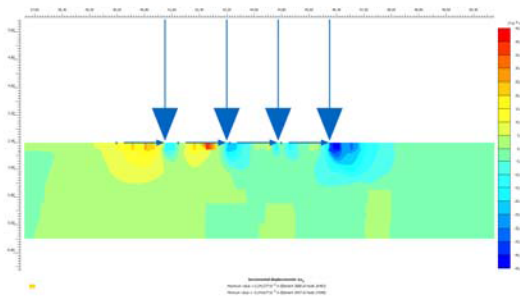






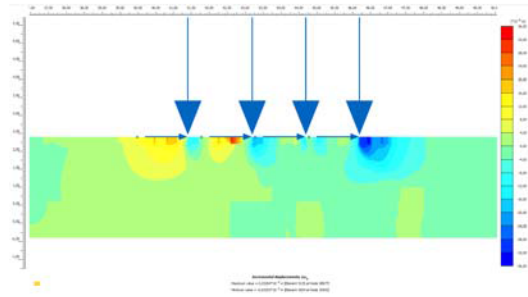
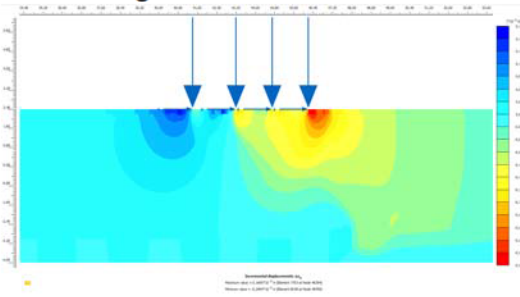






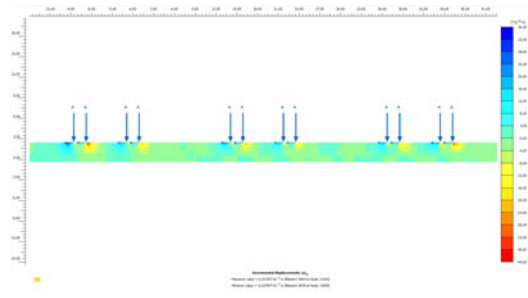
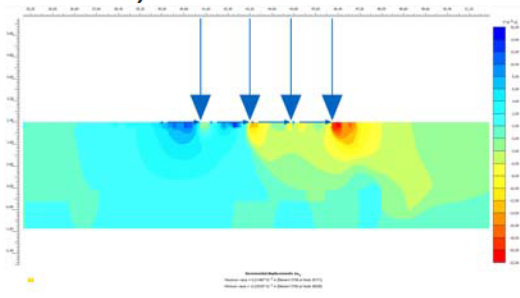
Geometria 5

Geometria 6



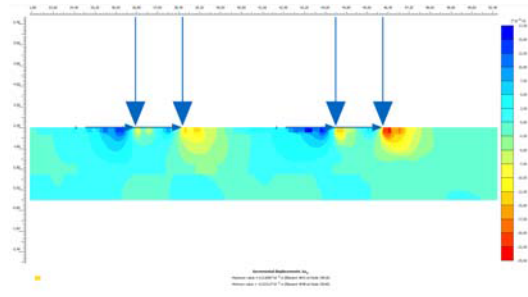
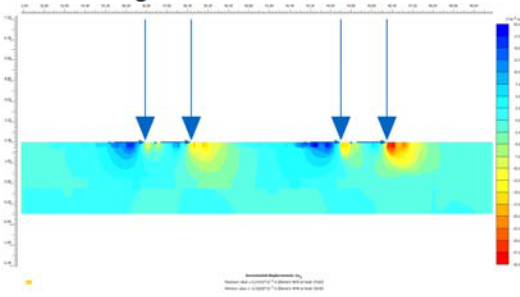
Geometria 7

Geometria 8



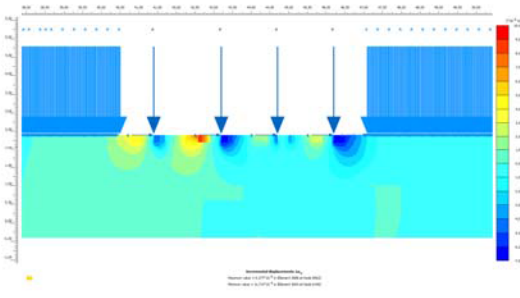
Geometria 9

Geometria 10



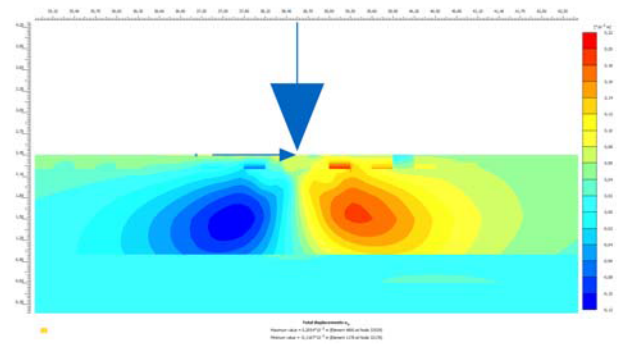
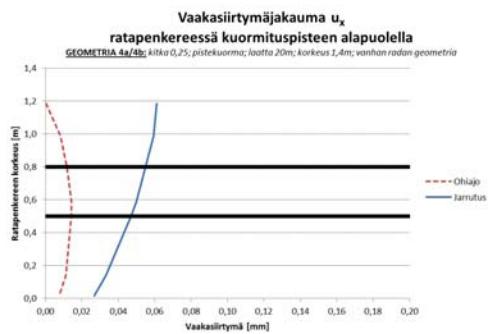
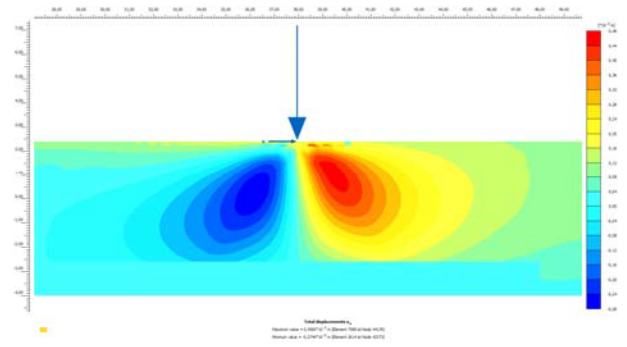
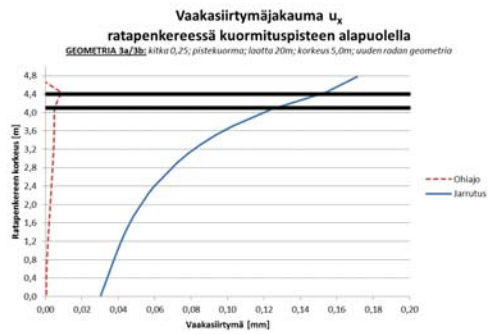
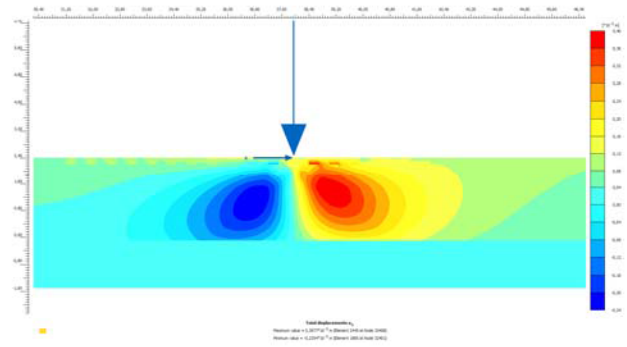
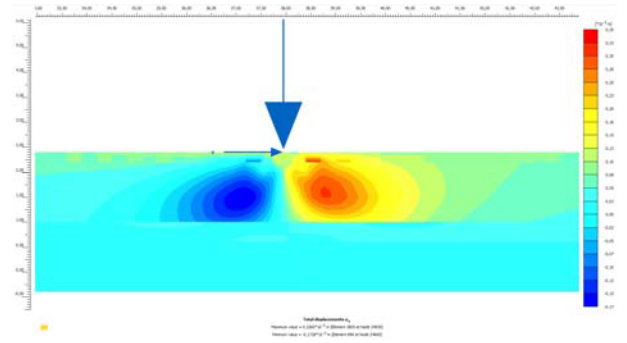
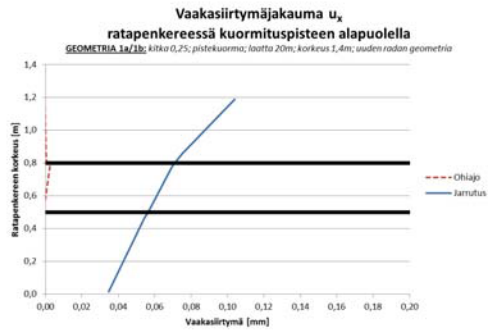
Geometria 11

Geometria 12

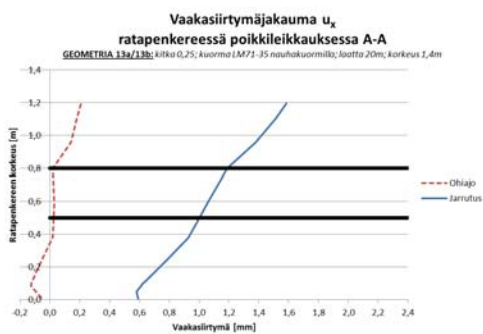
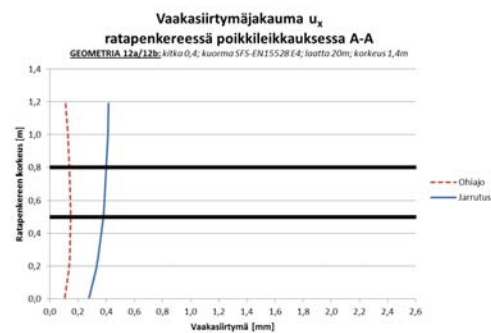
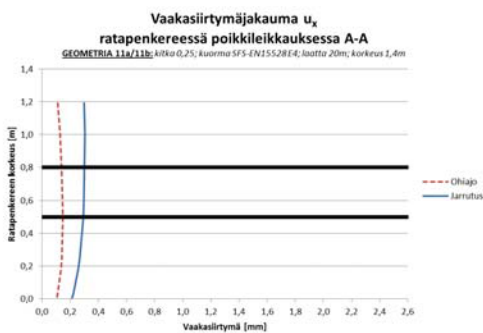
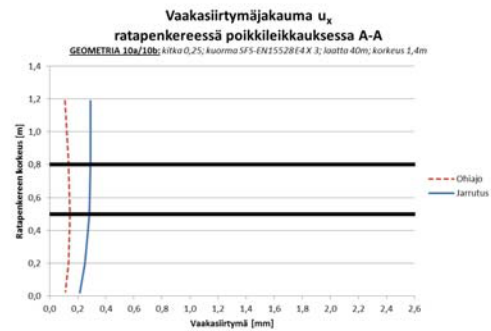
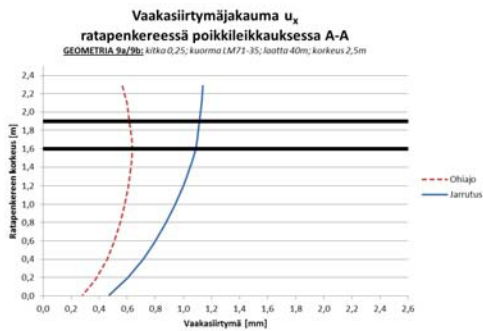
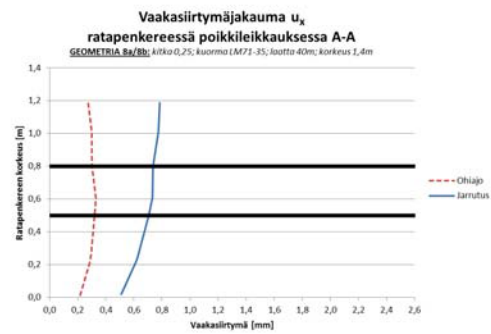
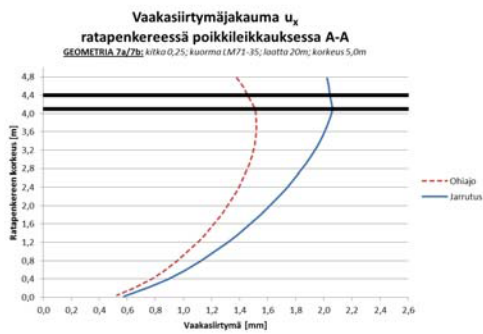
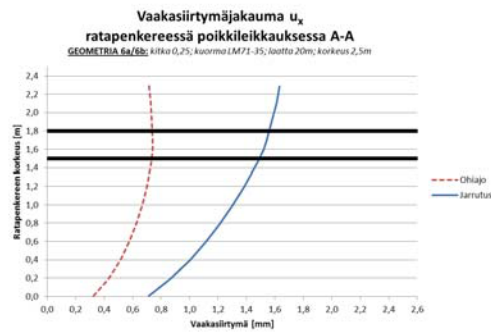
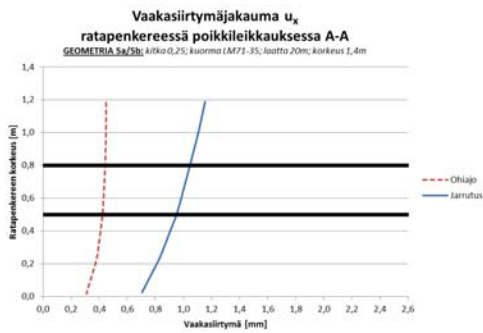


Geometria 13

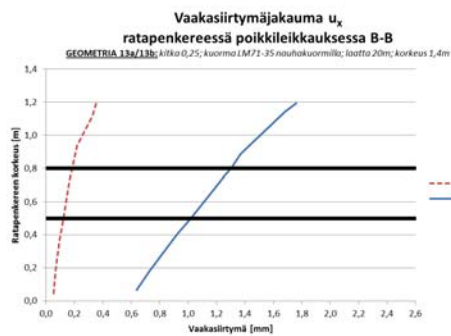
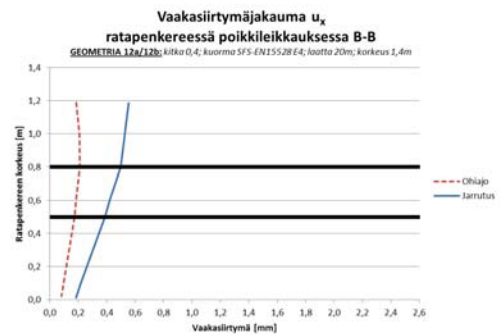
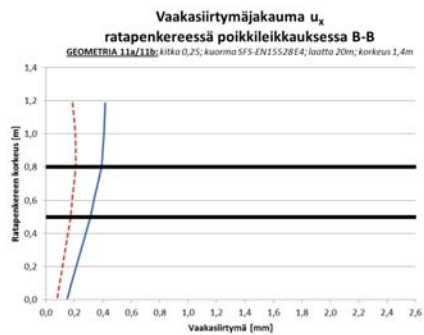
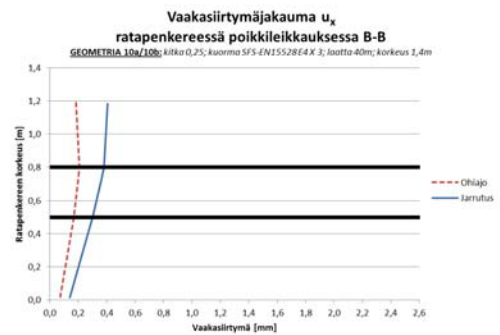
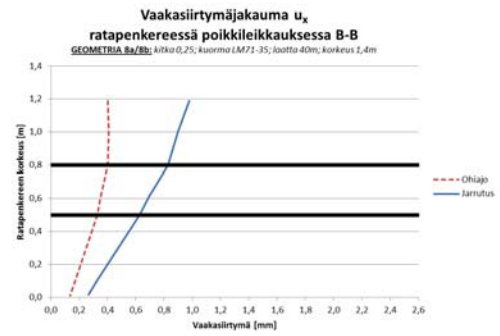
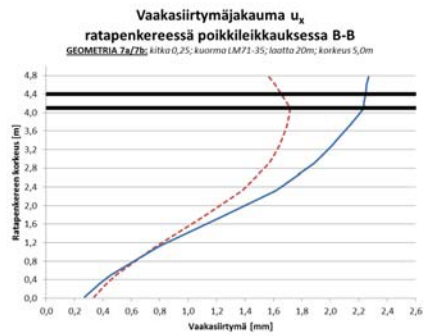
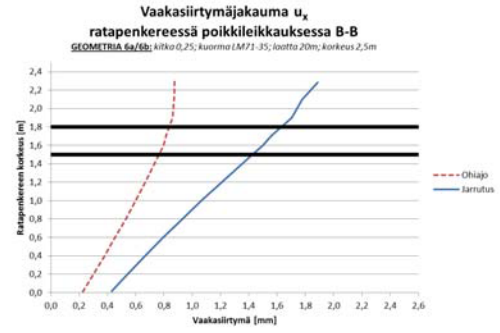
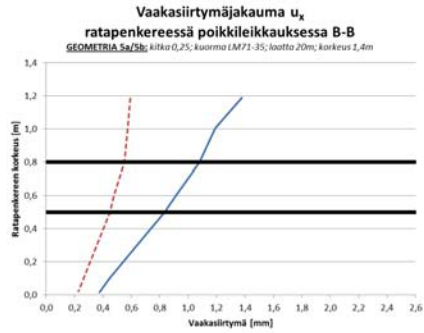


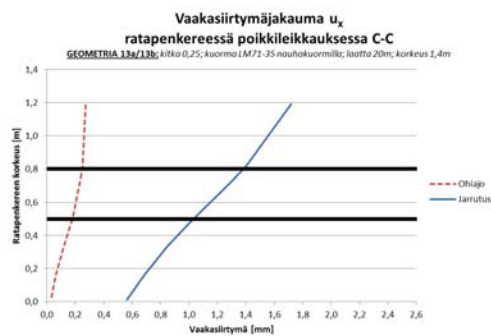
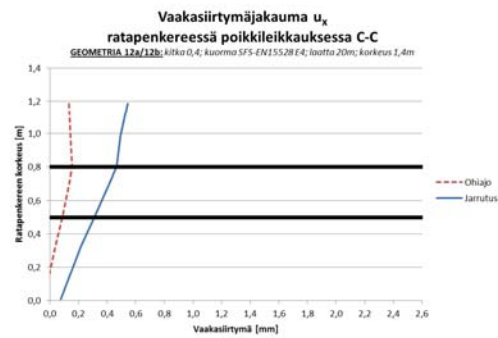
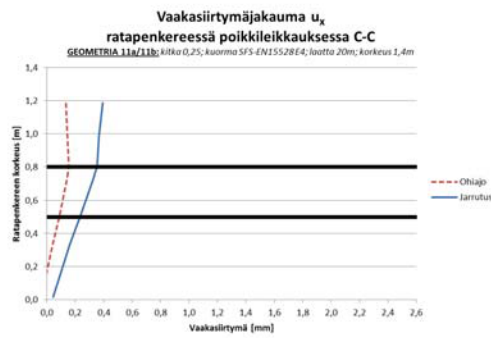
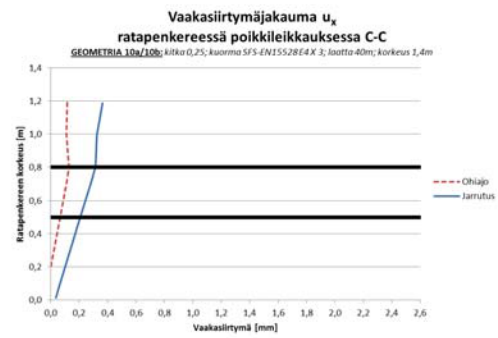
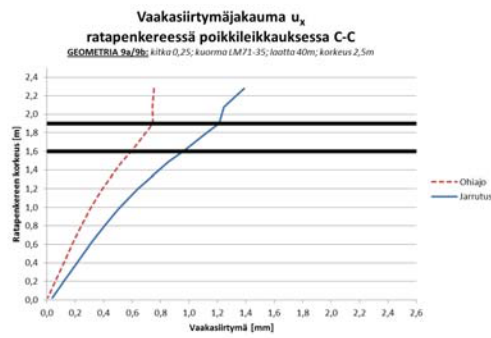
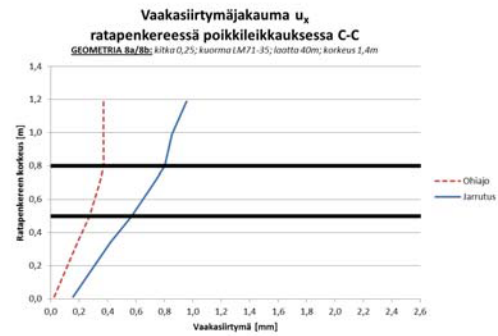
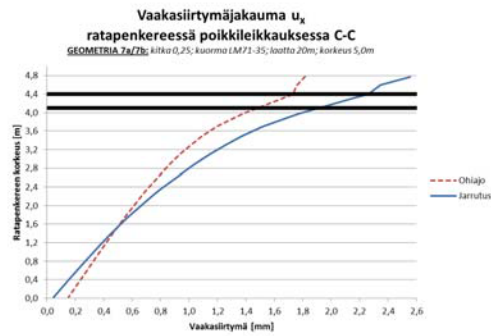
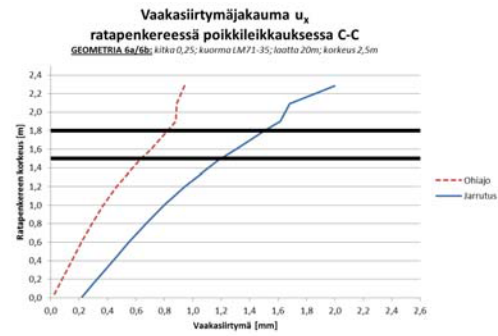
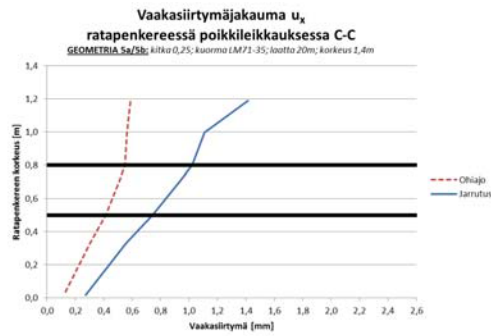


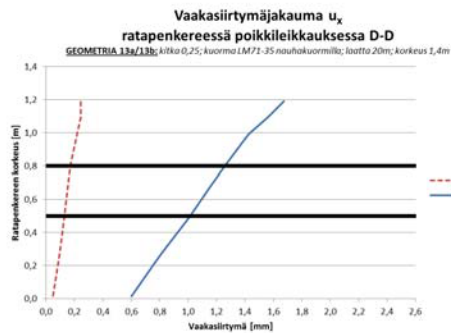
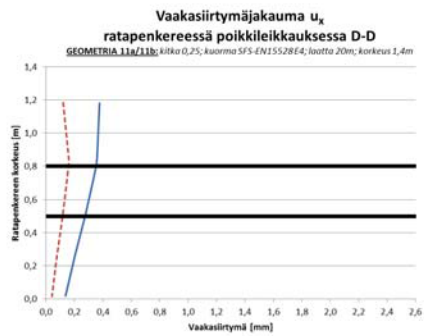
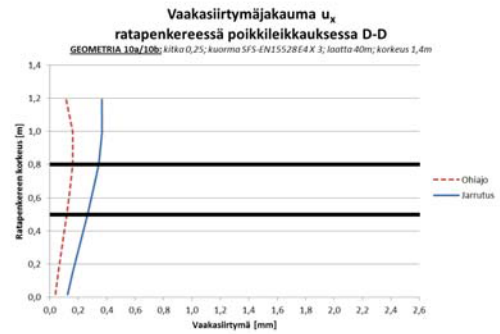
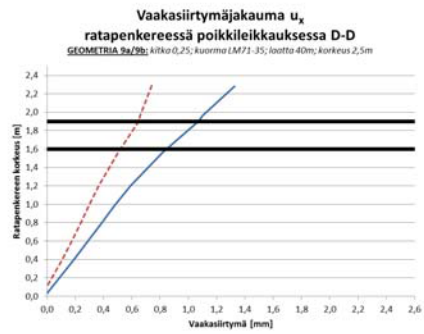
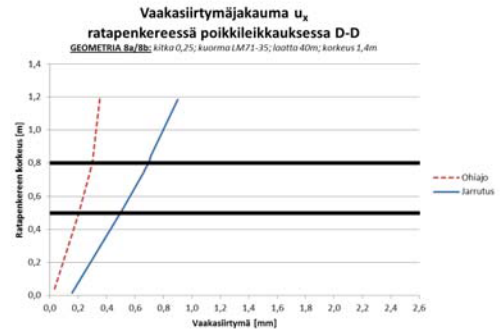
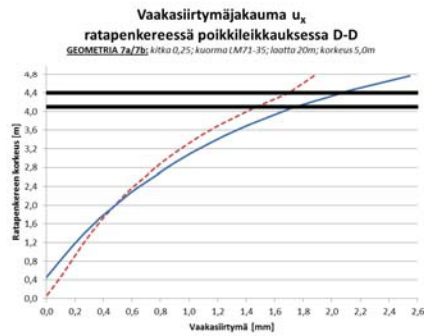
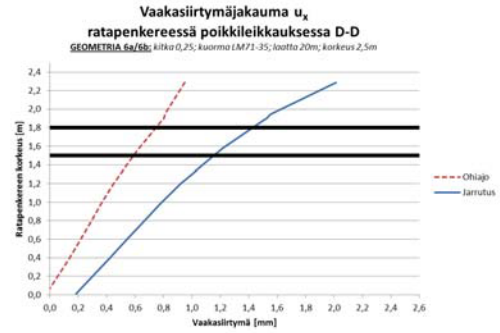
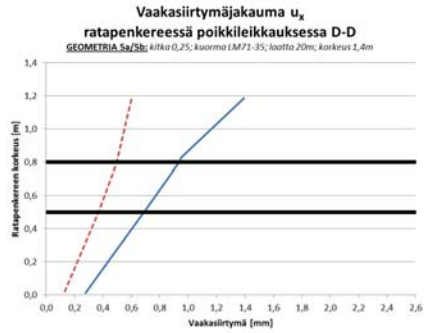


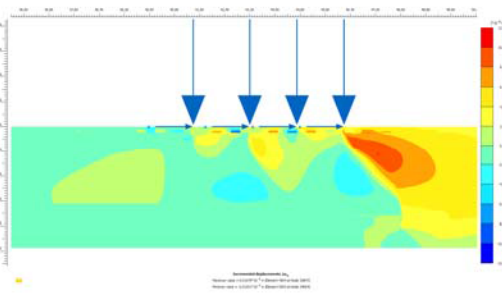
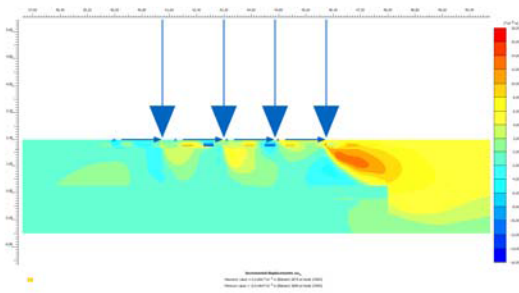




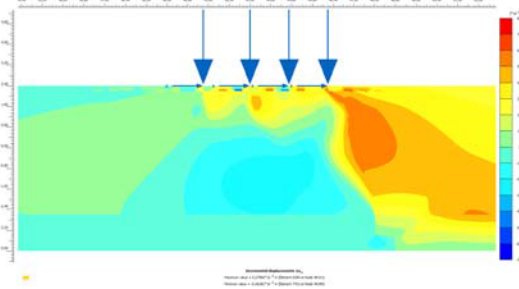




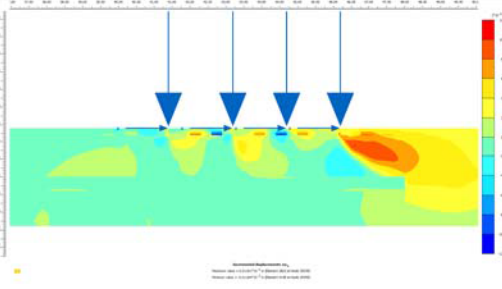




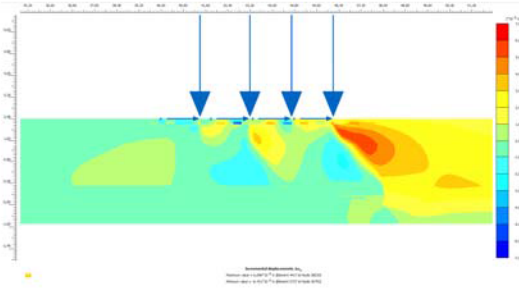
Geometria 5



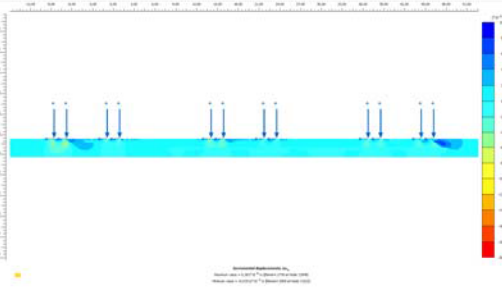
Geometria 6



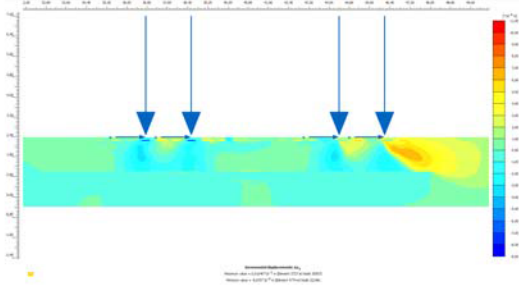
Geometria 7



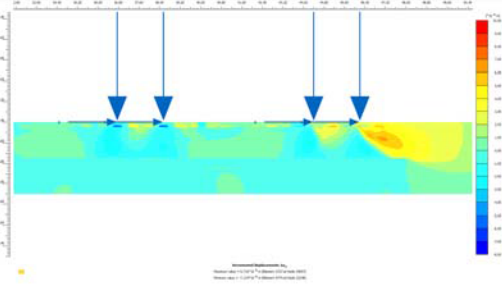
Geometria 8



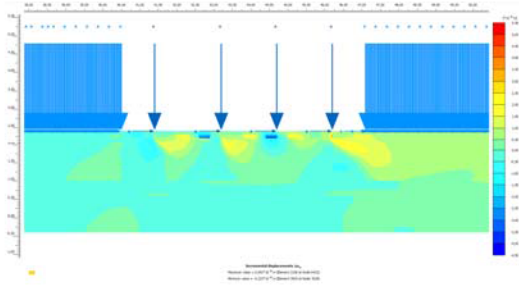
Geometria 9



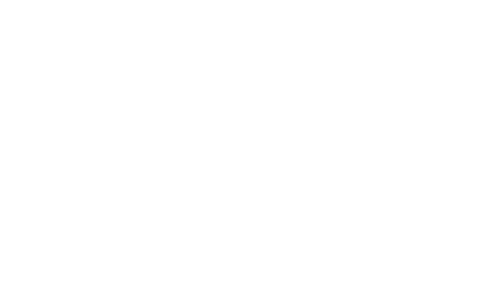
Geometria 1



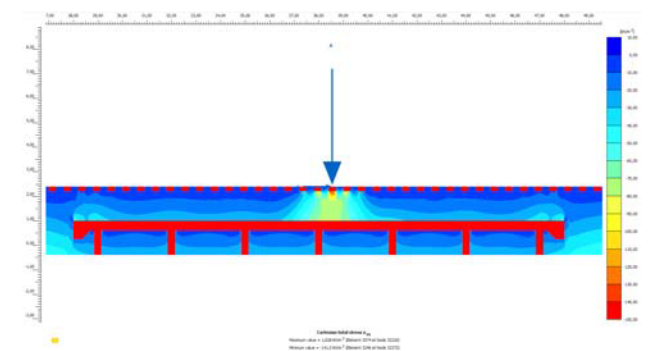
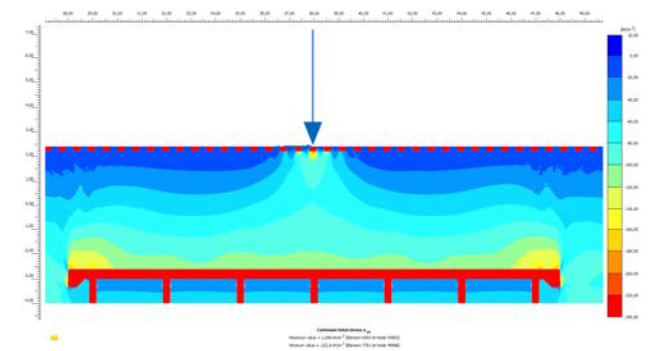
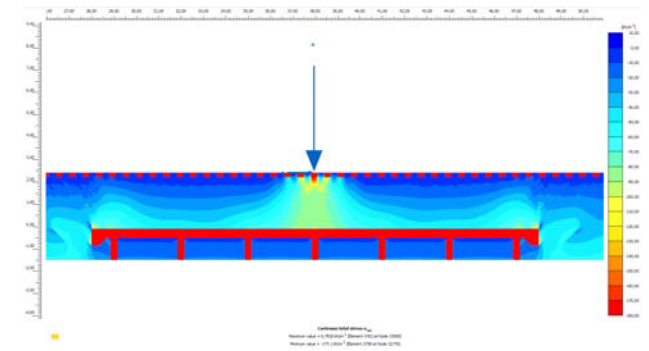
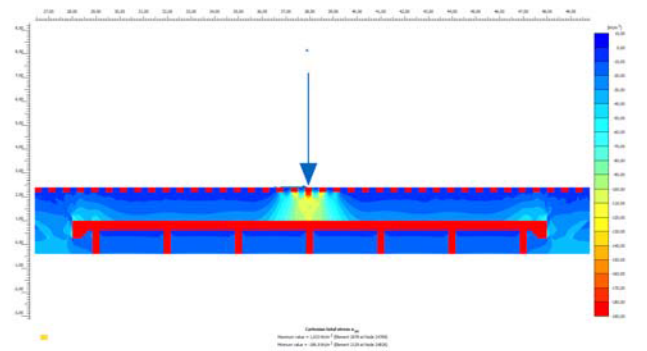
Geometria 11



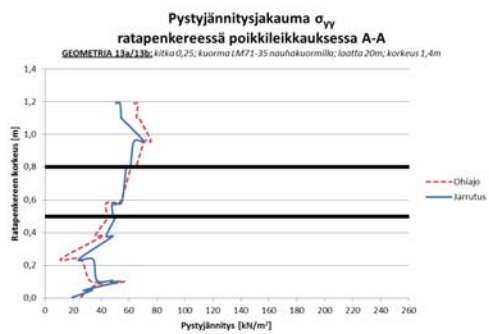
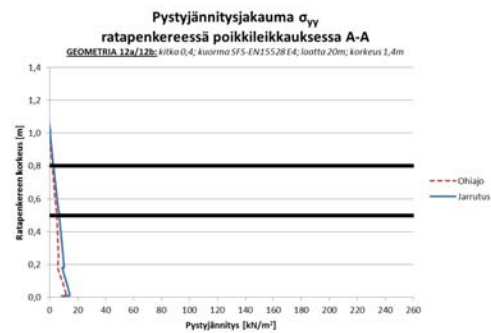
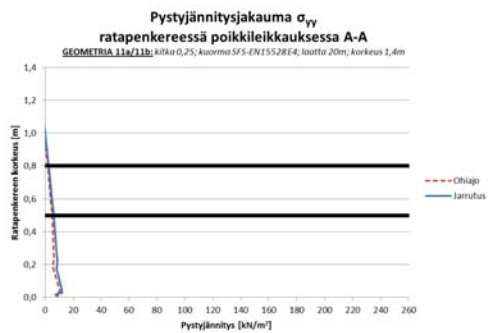
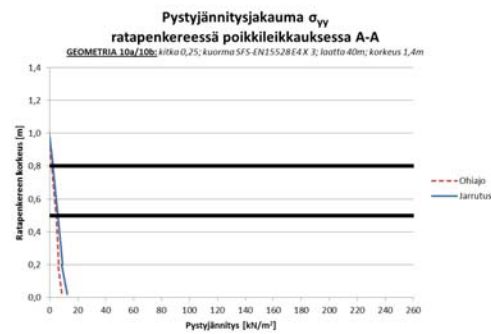
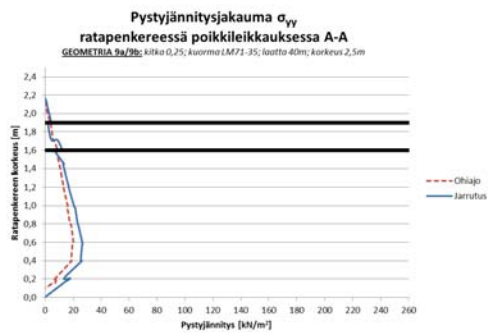
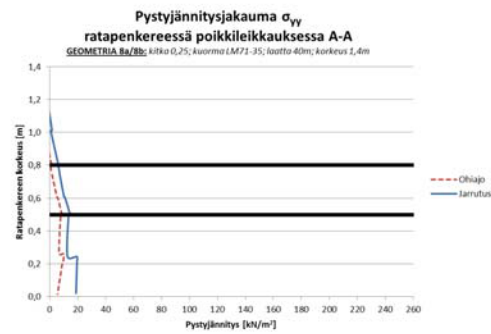
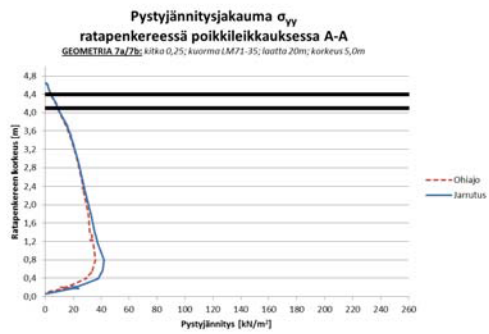
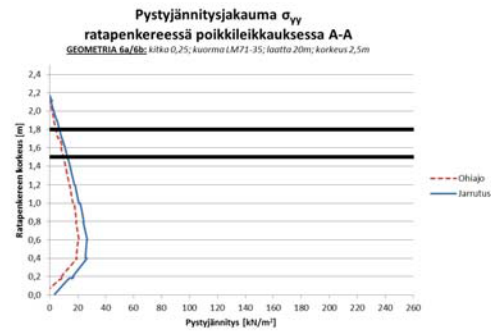
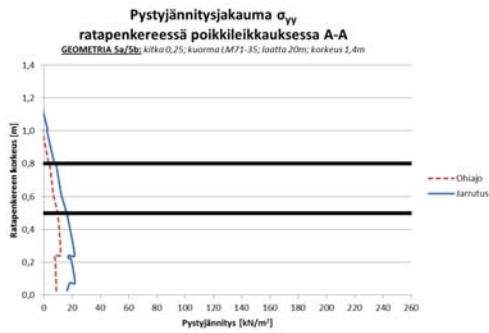
Geometria 12

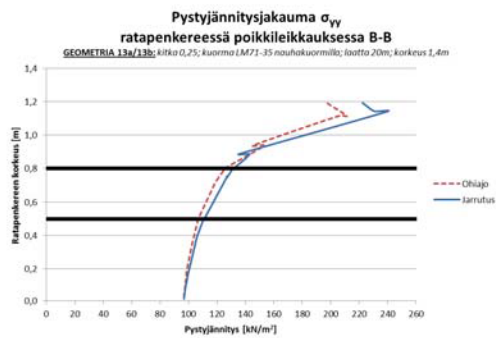
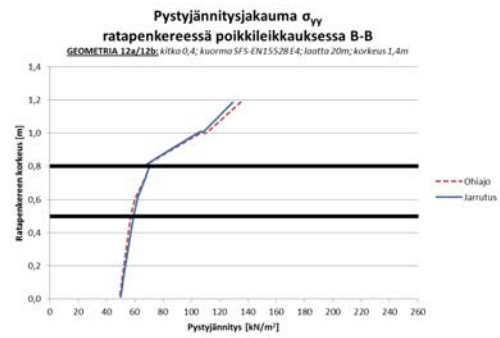
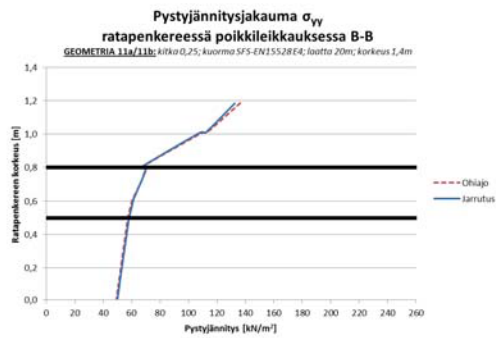
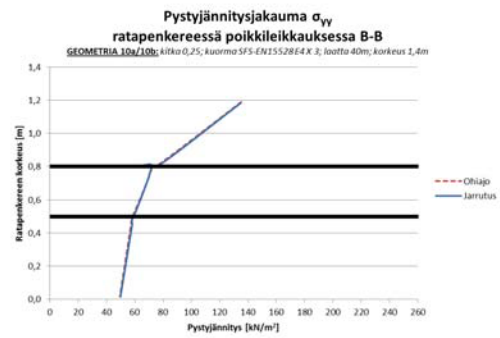
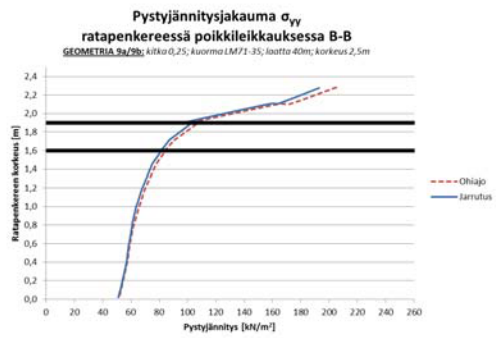
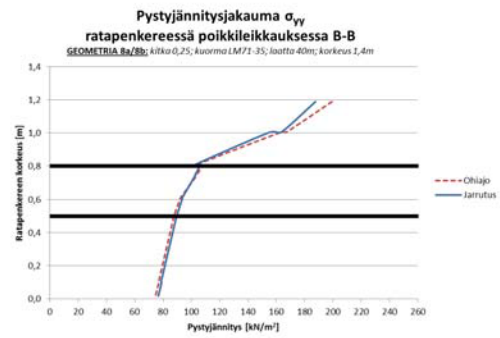
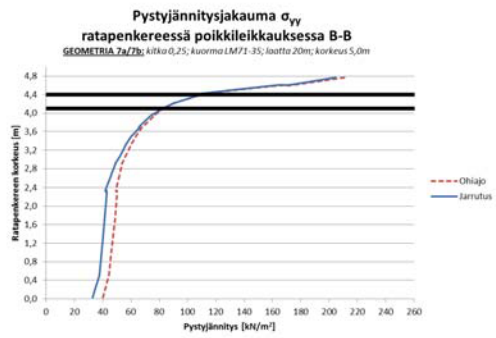
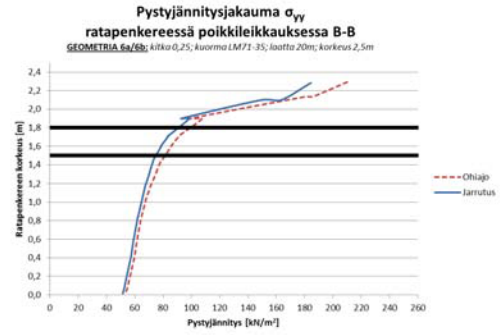
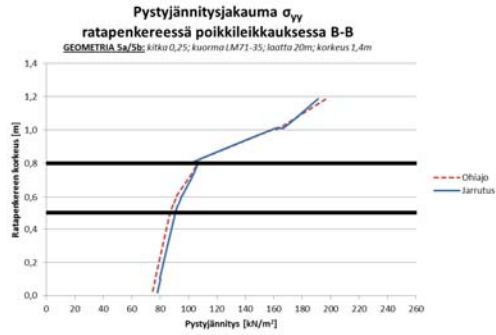


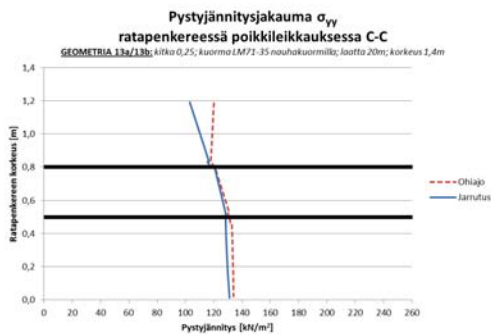
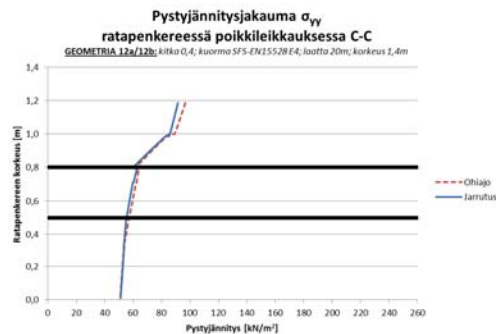
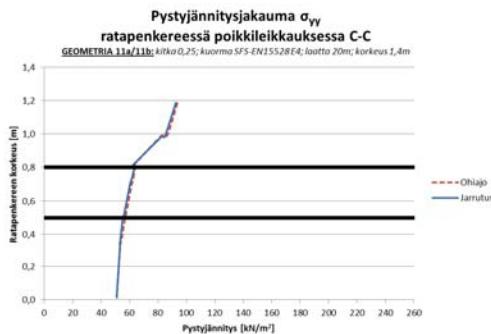
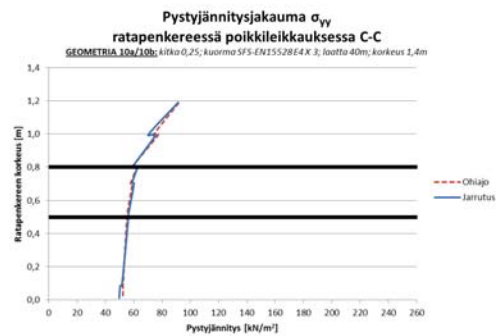
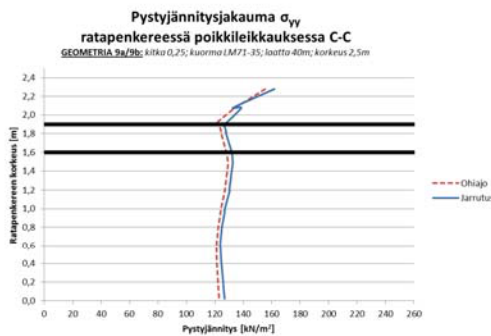
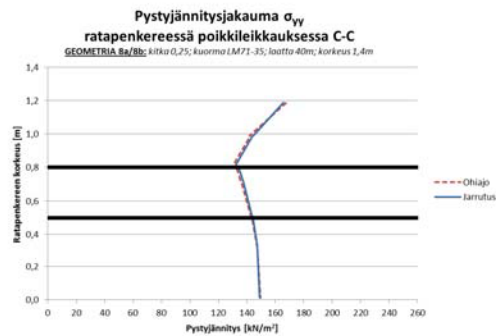
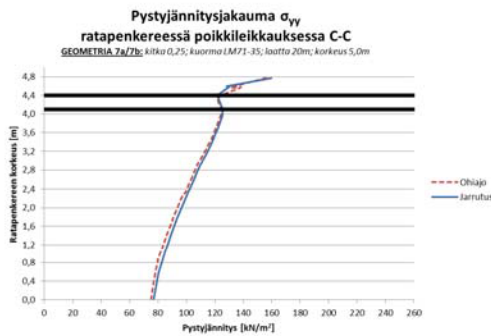
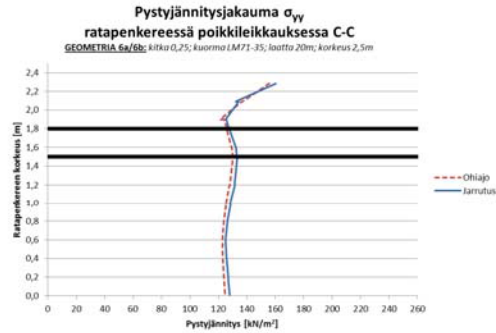
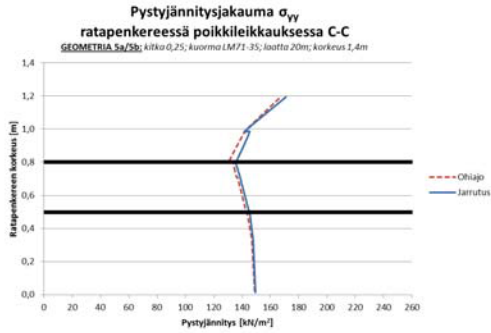
Geometria 13



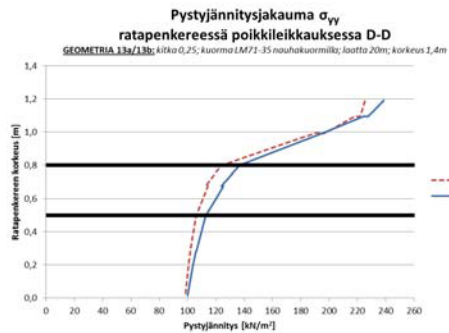
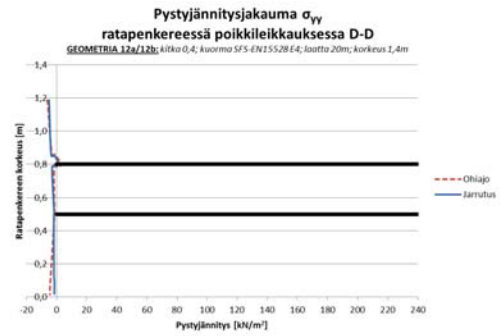
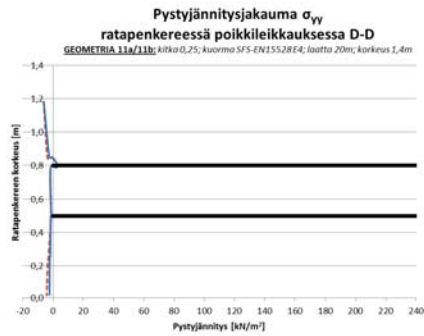
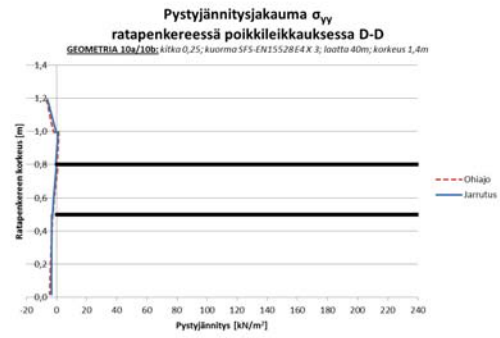
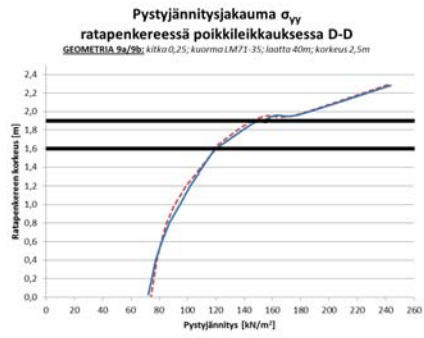
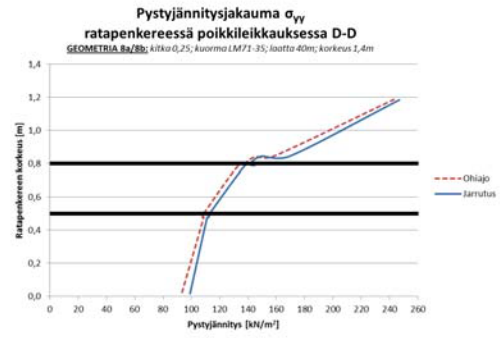
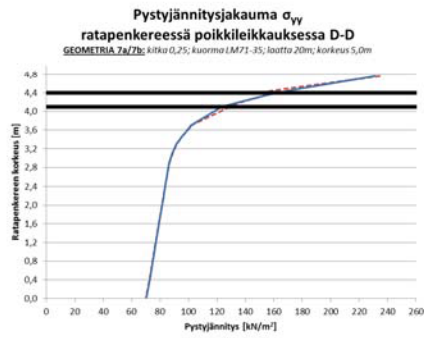
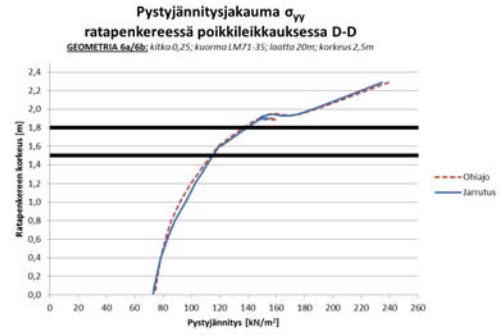
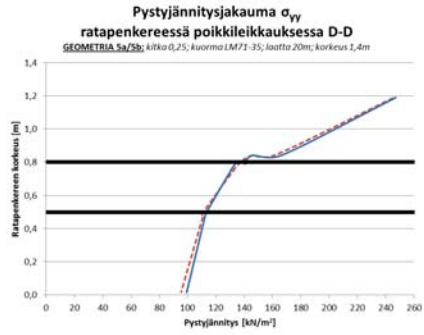


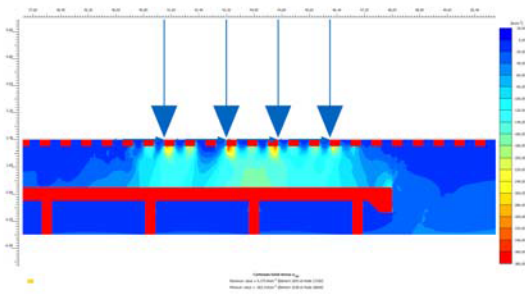




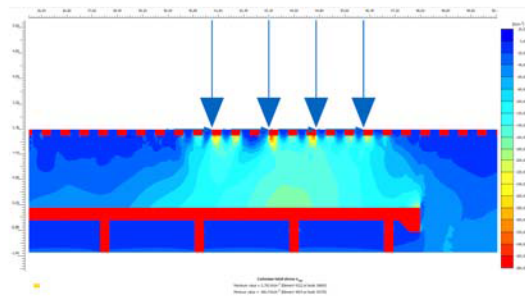




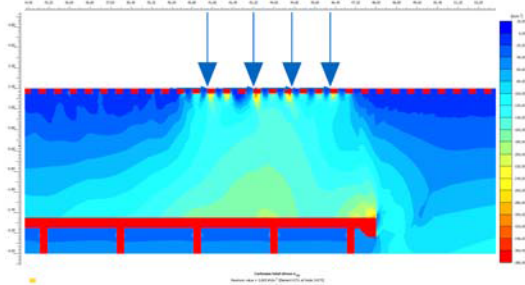




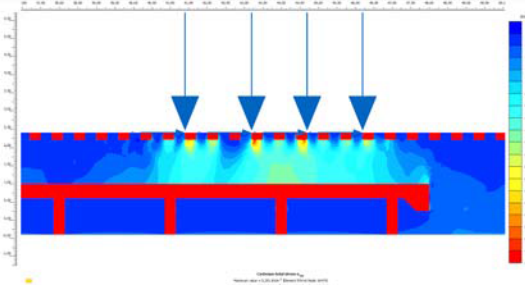
Geometria 5



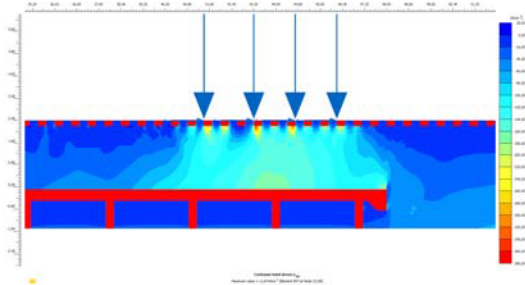
Geometria 6



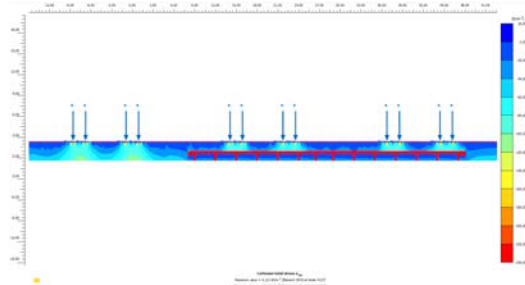
Geometria 7



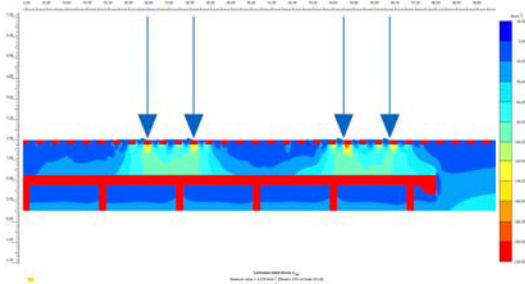
Geometria 8



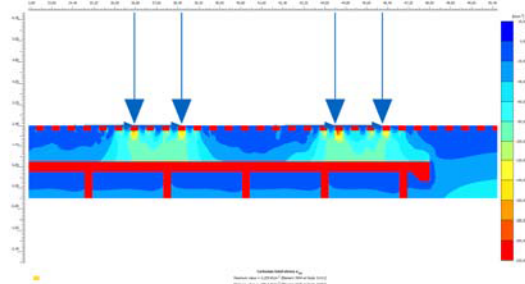
Geometria 9



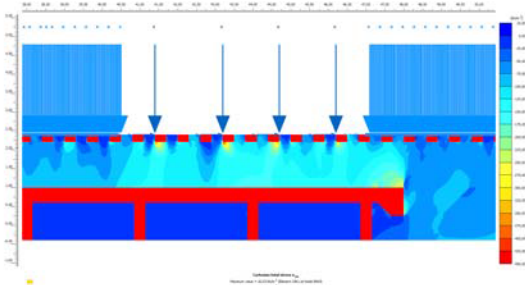
Geometria 10



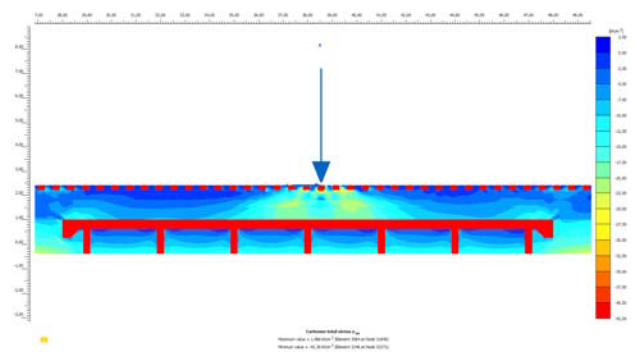
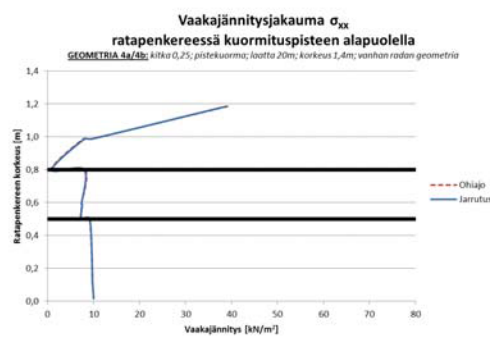
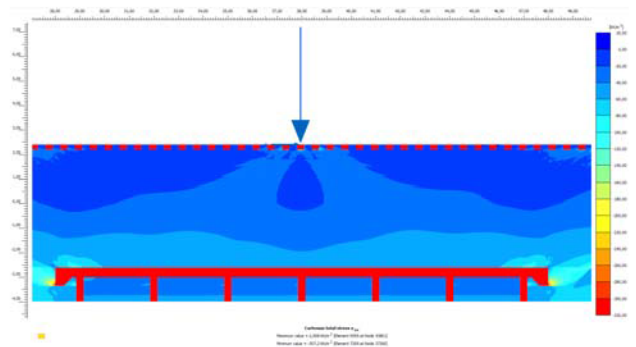
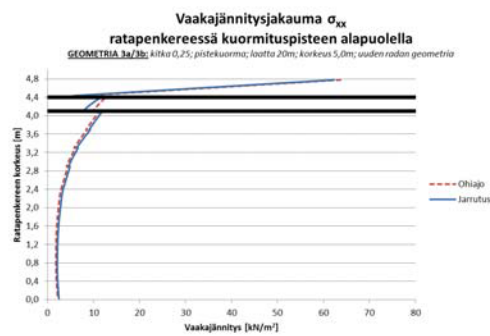
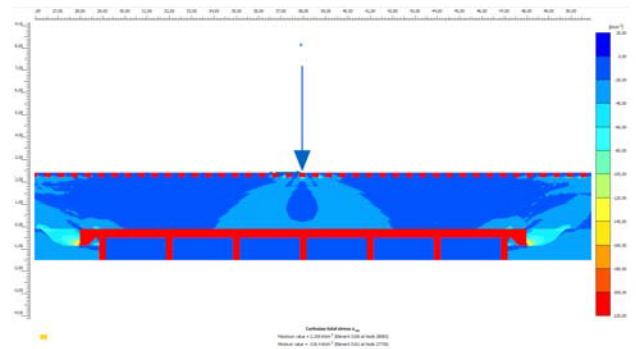
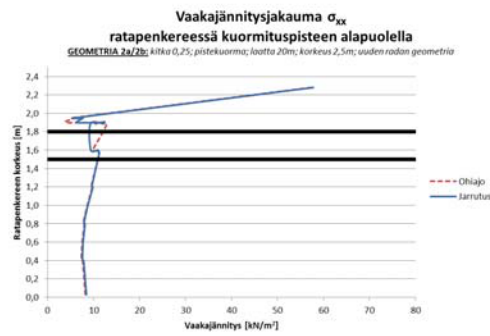
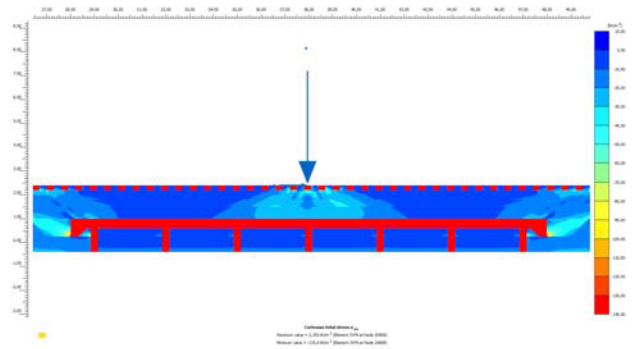
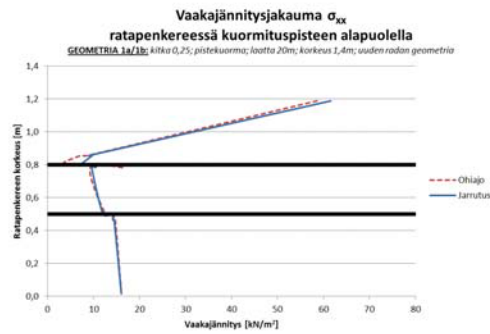
Geometria 11

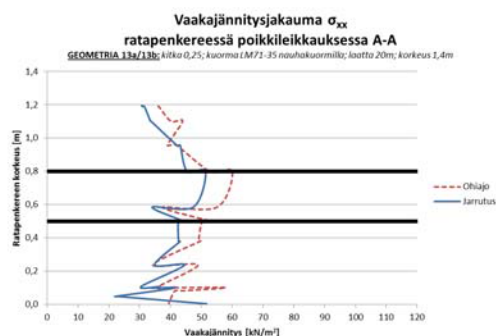
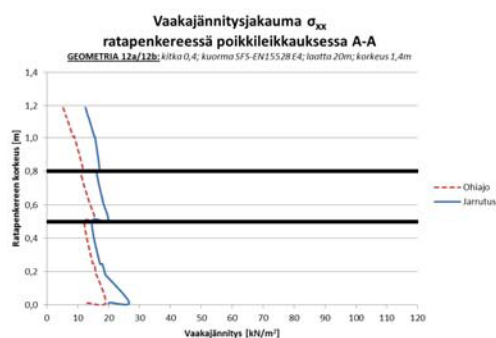
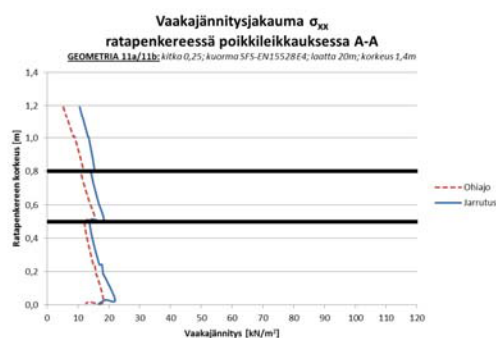
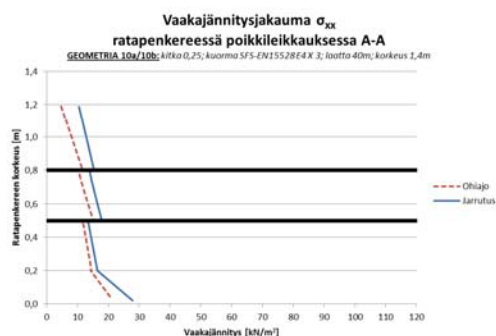
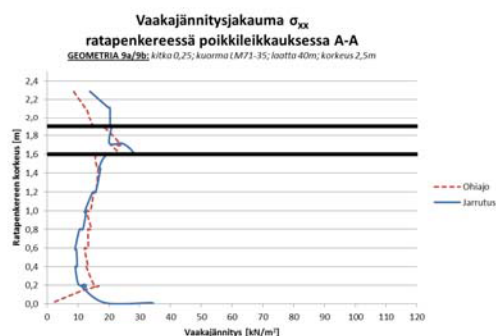
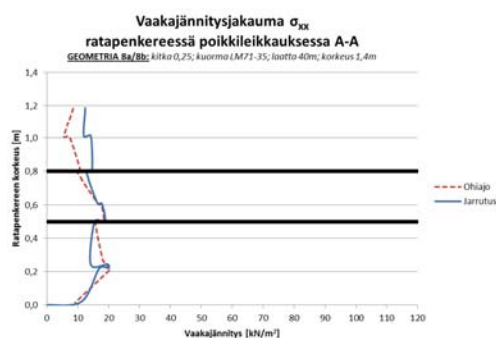
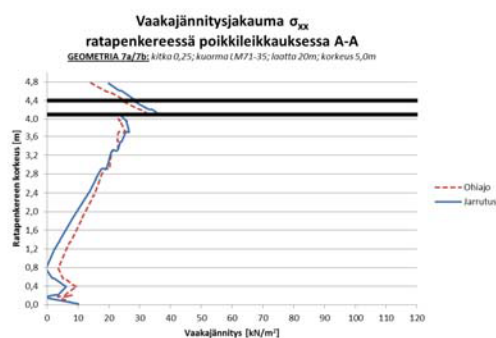
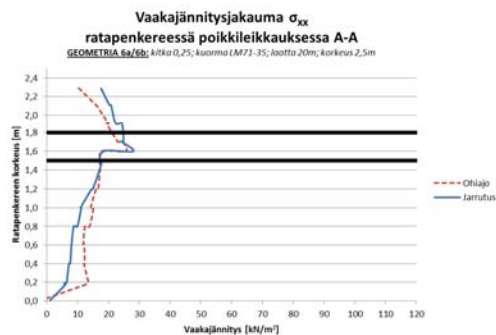
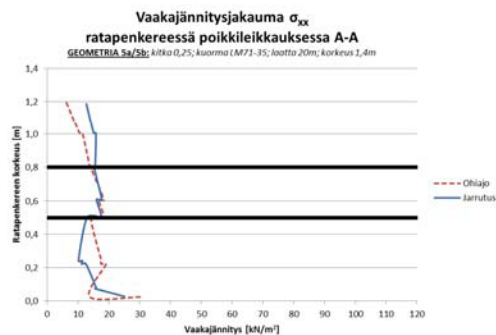


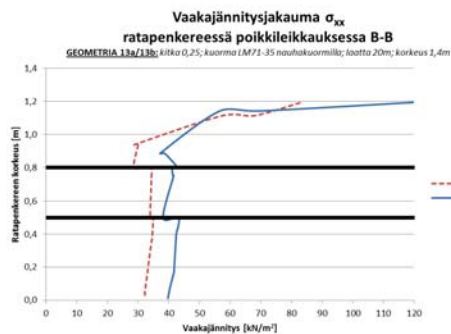
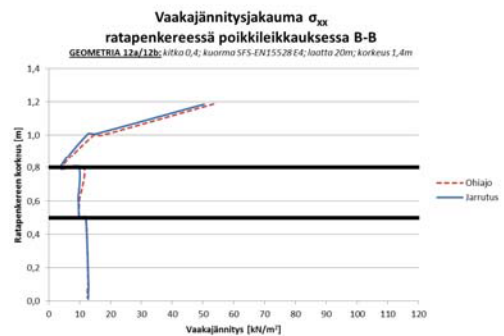
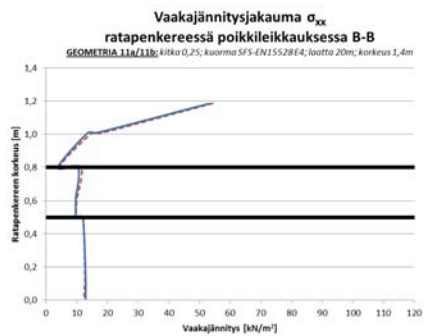
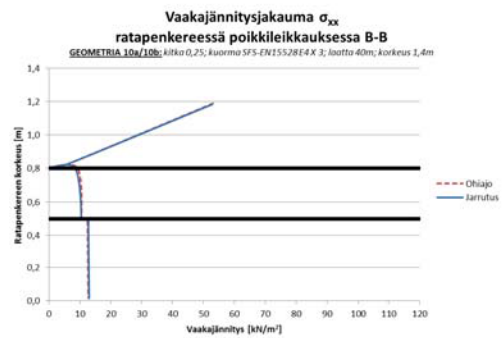
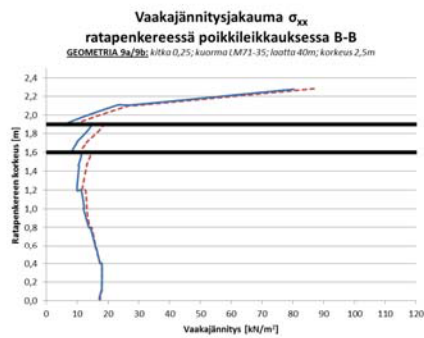
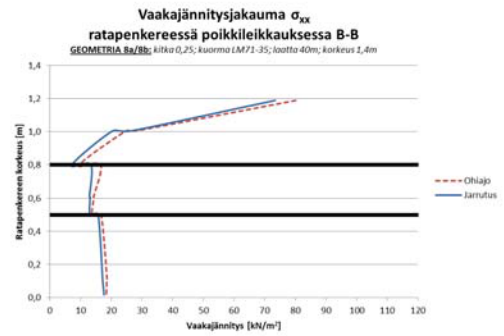
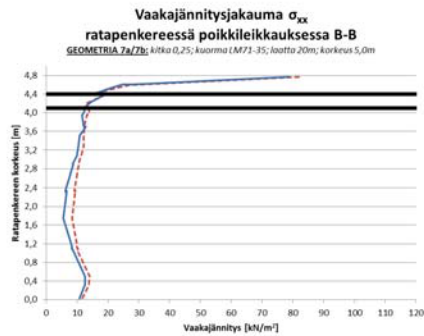
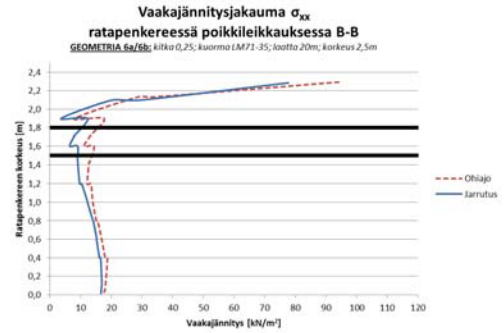
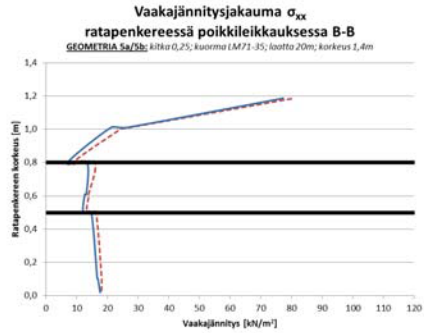
Geometria 12



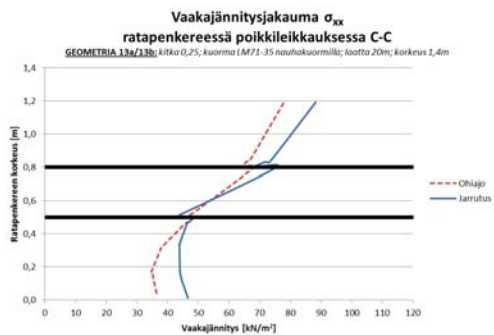
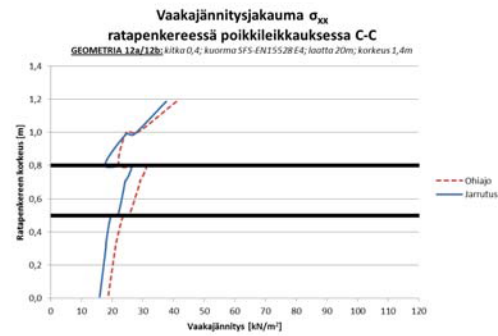
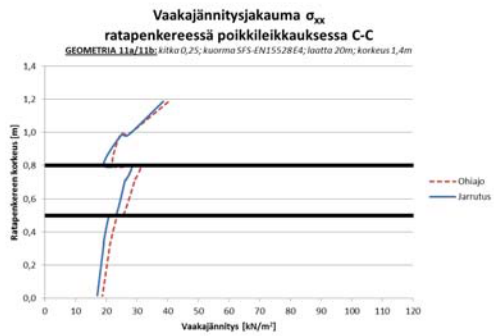
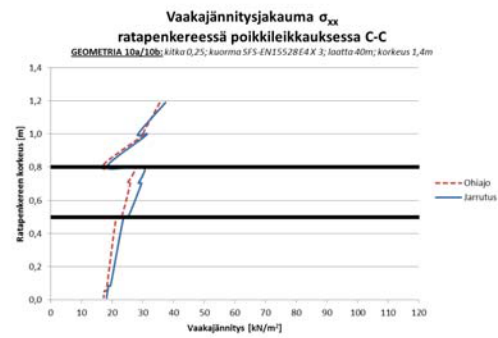
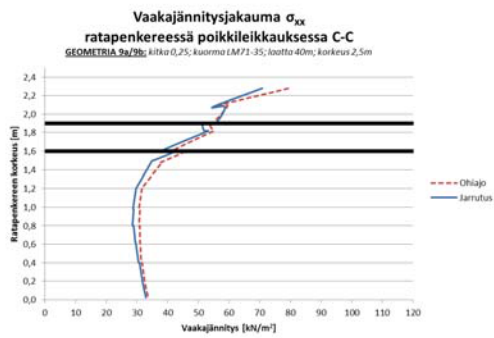
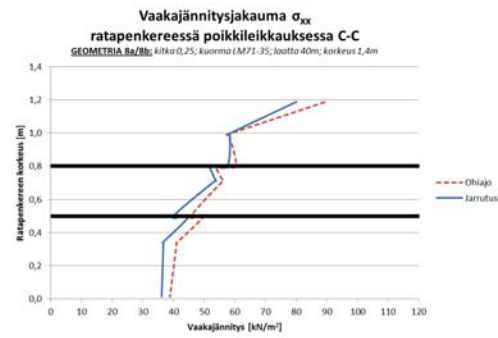
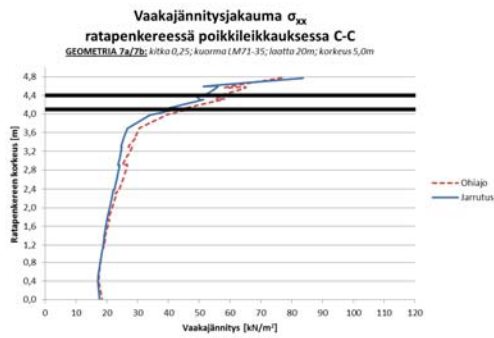
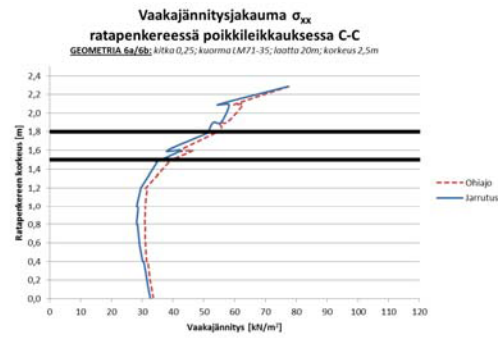
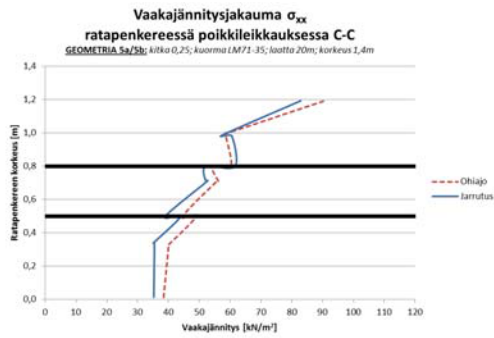
Geometria 13

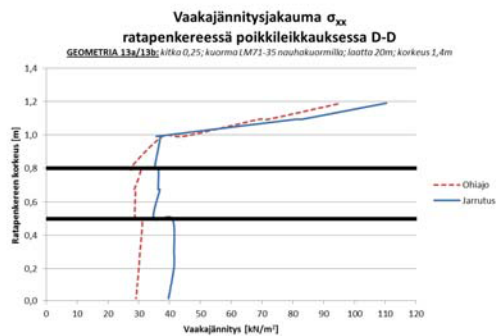
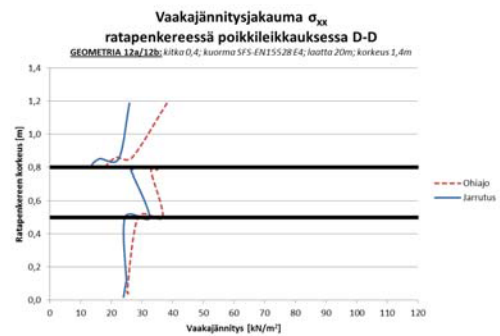
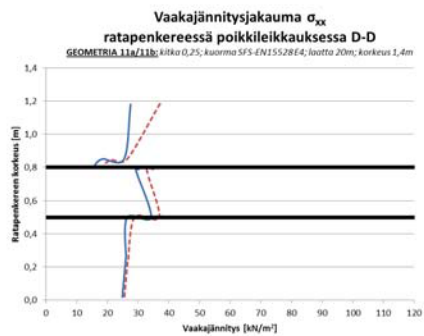
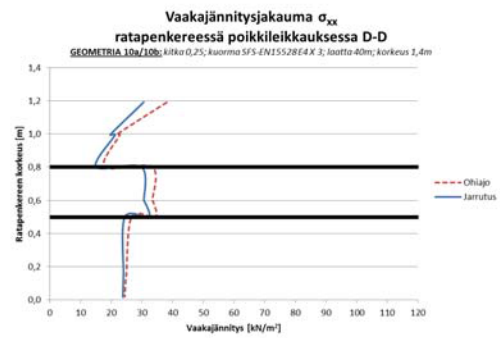
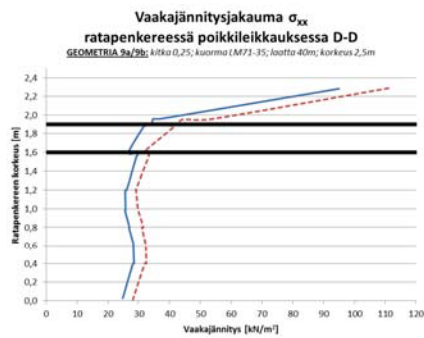
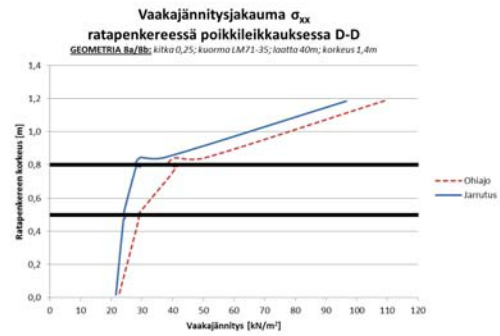
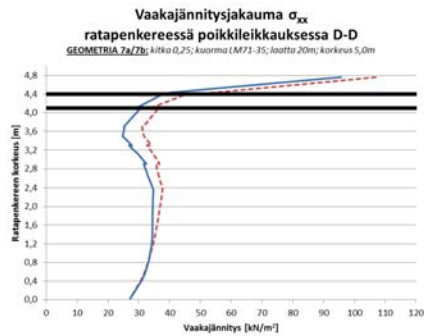
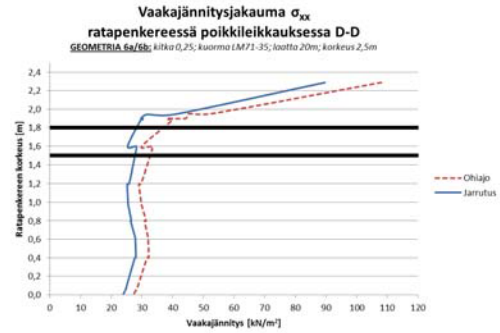
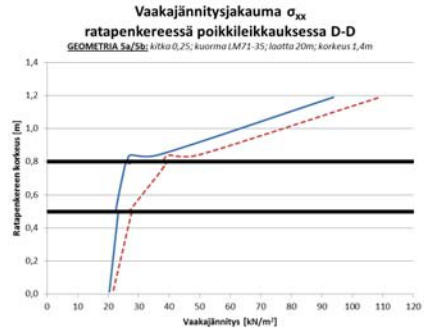


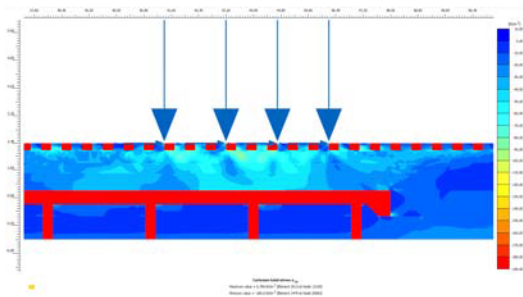




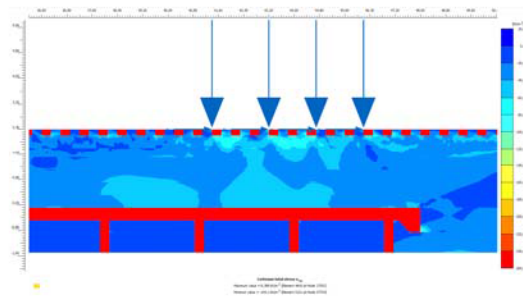




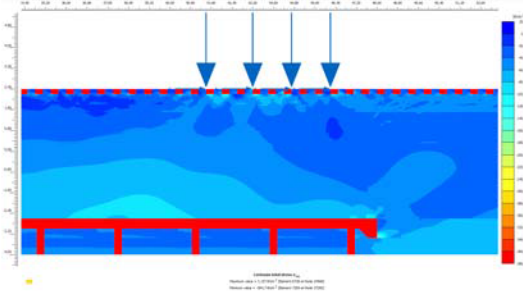




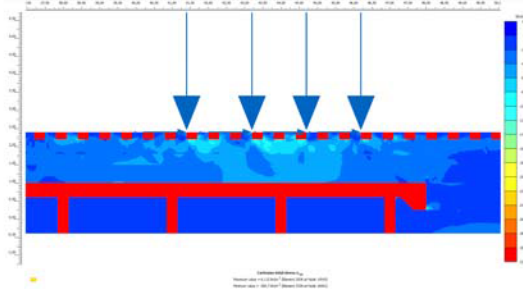
Geometria 5



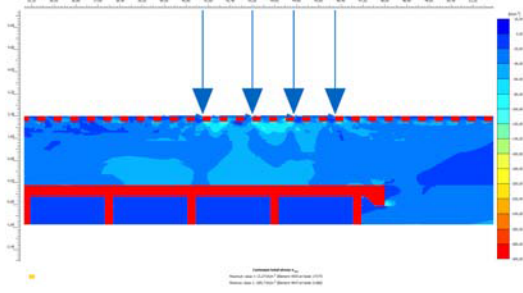
Geometria 6



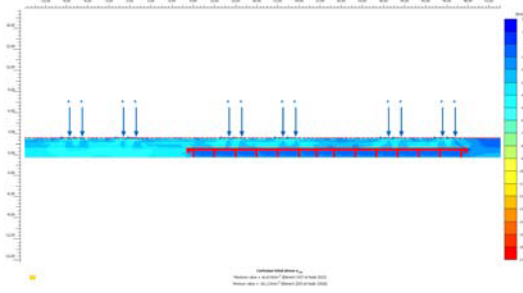
Geometria 7



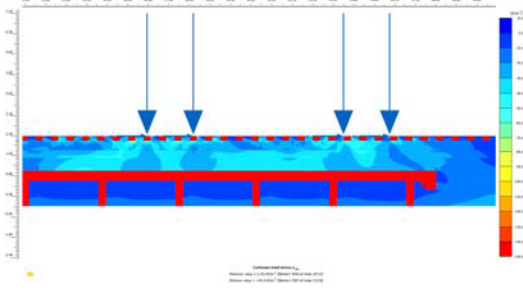
Geometria 8



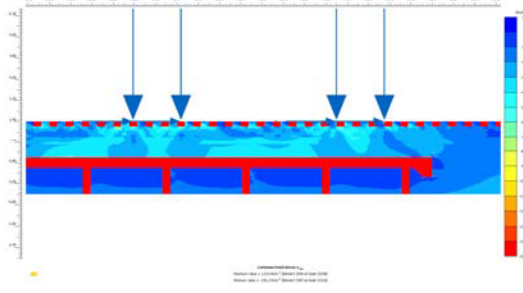
Geometria 9



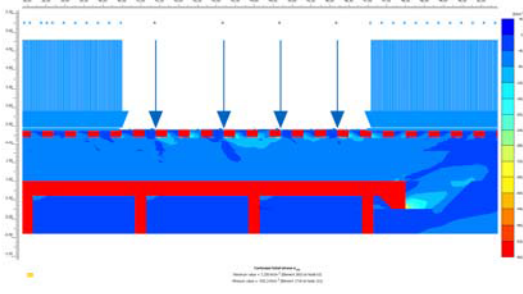
Geometria 10



Geometria 11



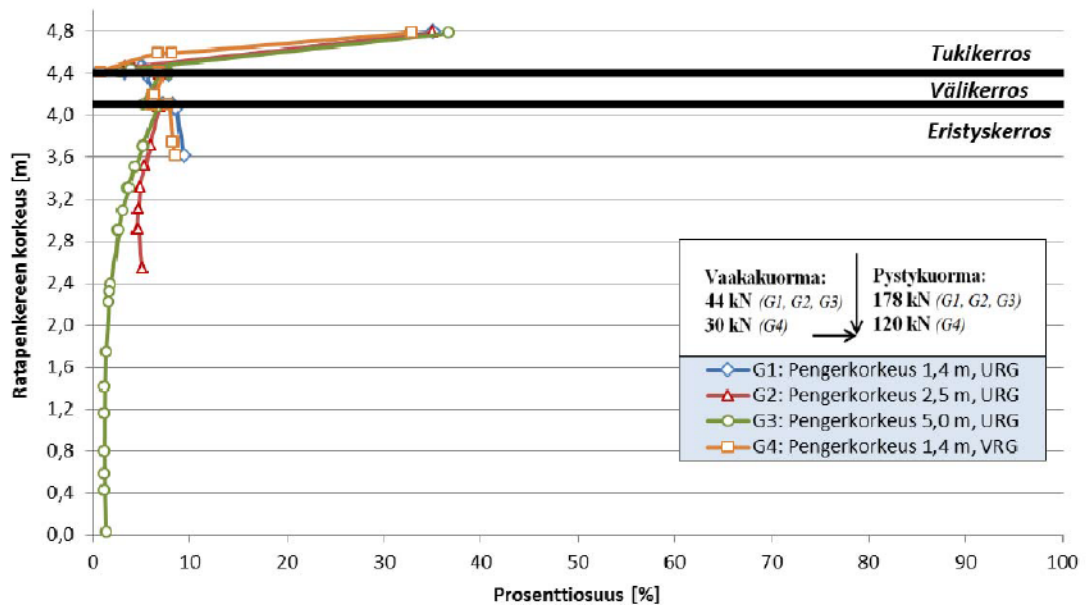
Geometria 12



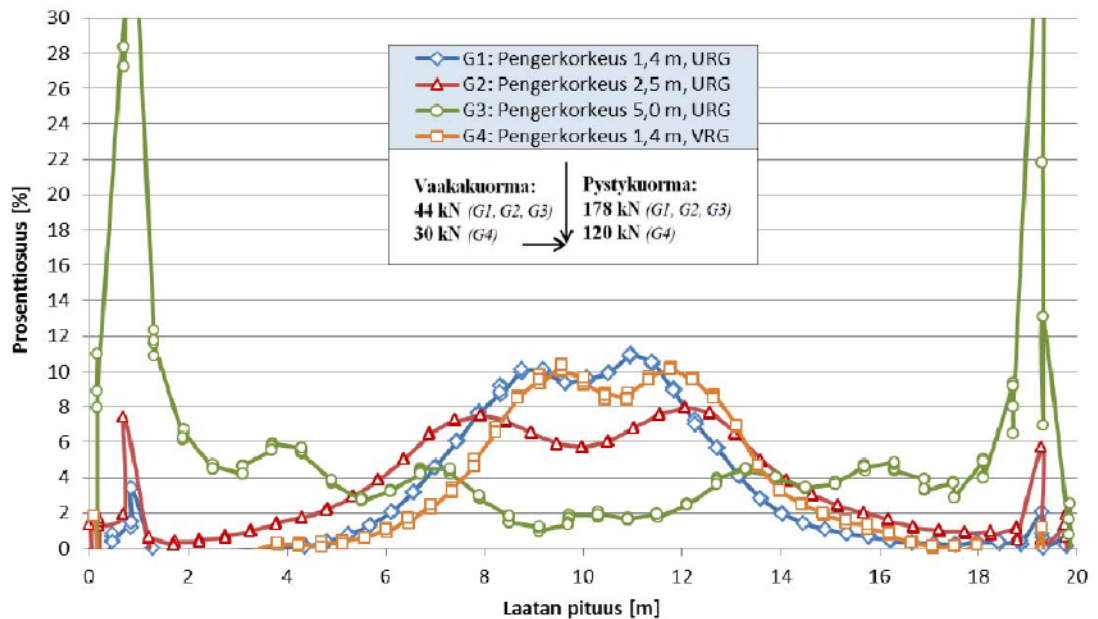
Geometria 13



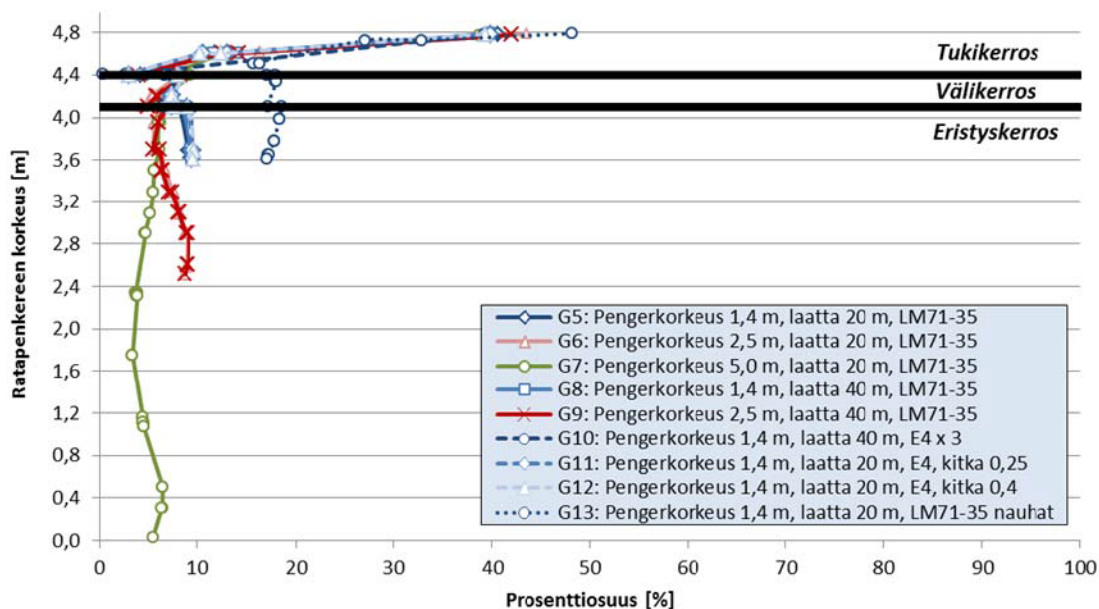
### Vaakajännityksen osuus maksimipystyjännityksestä pistekuorman alapuolella



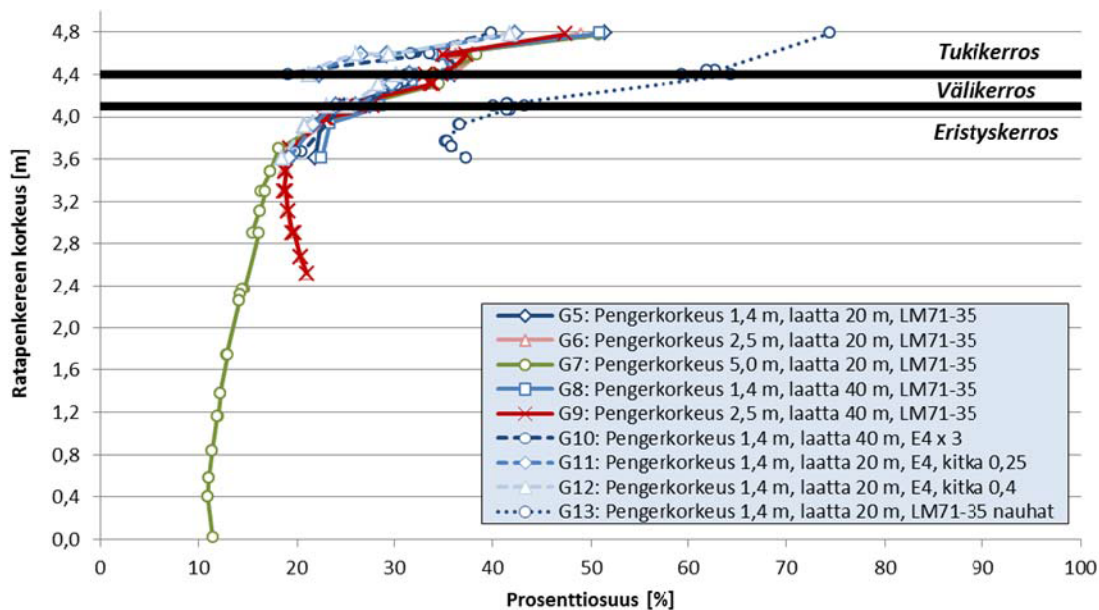
### Pengerlaatan yläpinnan vaakajännityksen osuus ratapölkyn alapinnan maksimipystyjännityksestä

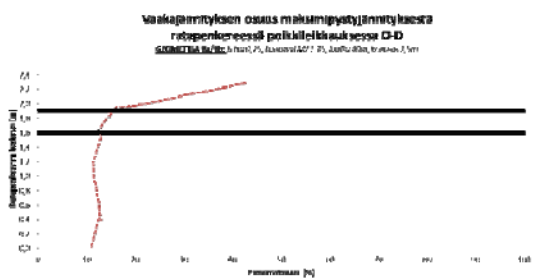
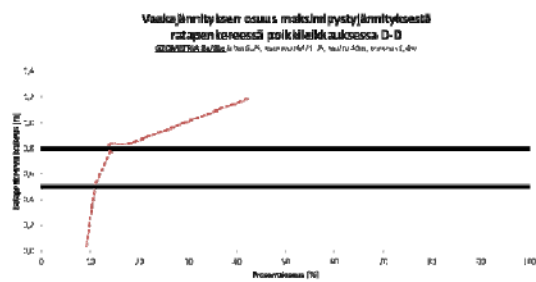
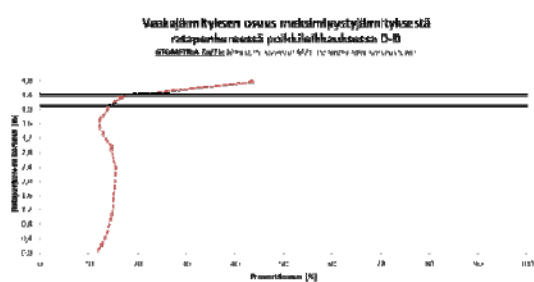
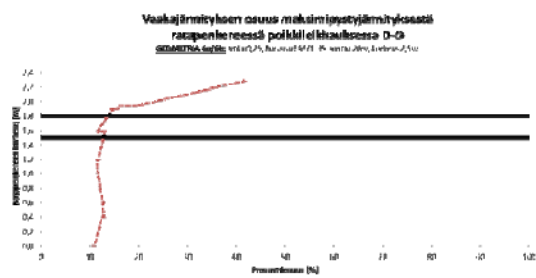
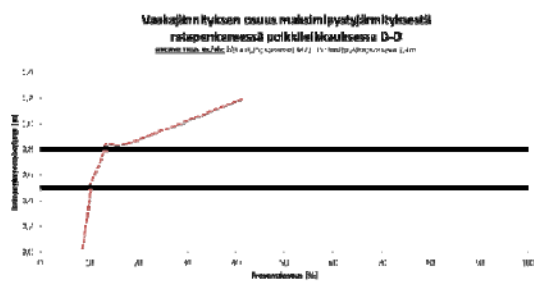


### Vaakajännityksen osuus maksimipystyjännityksestä poikkileikkauksessa B-B



### Vaakajännityksen osuus maksimipystyjännityksestä poikkileikkauksessa C-C

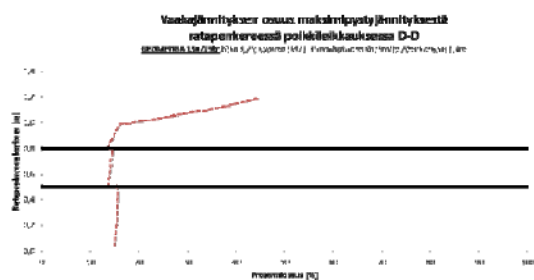




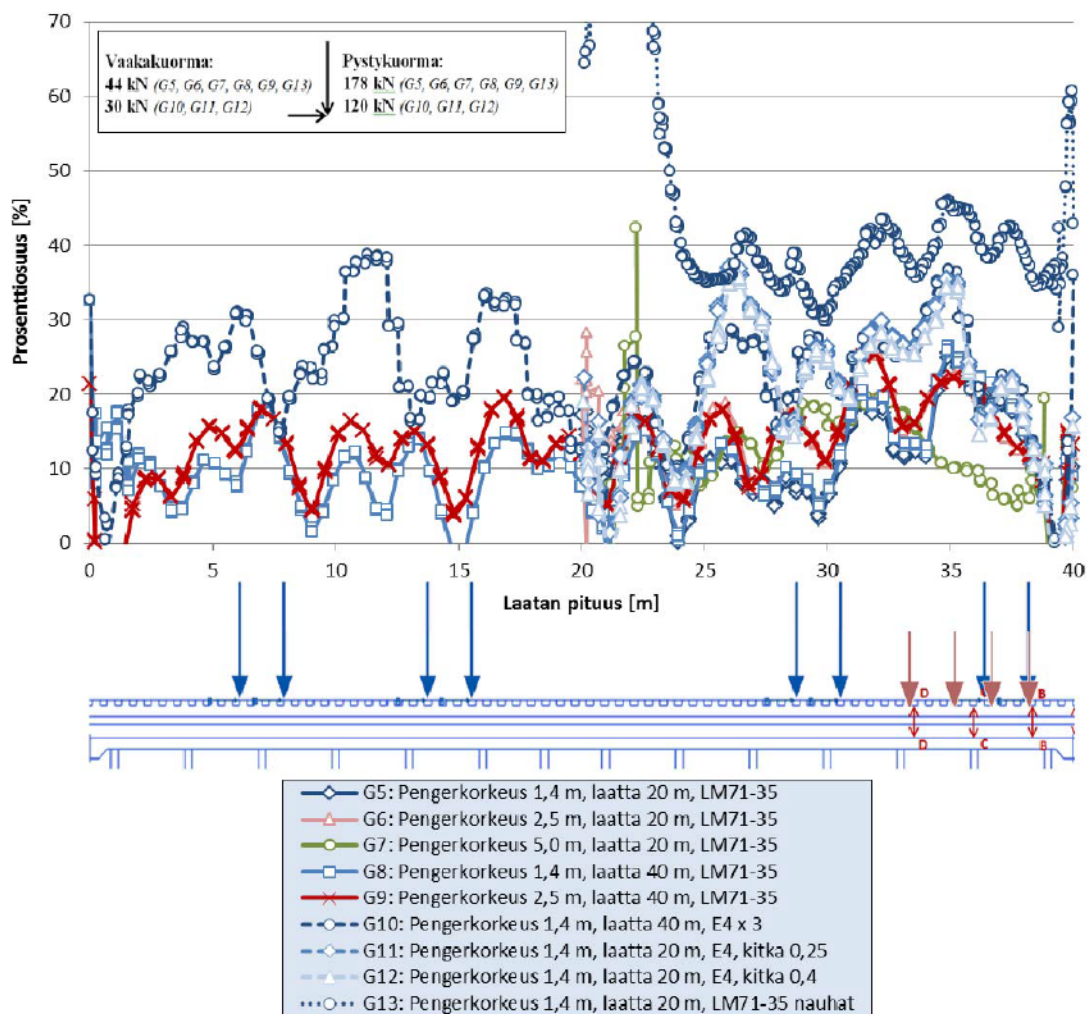
*Ei tuloksia. Pystyjännitysjakautuma ei ole edustava [kts. Liite 3 (6/7)].*

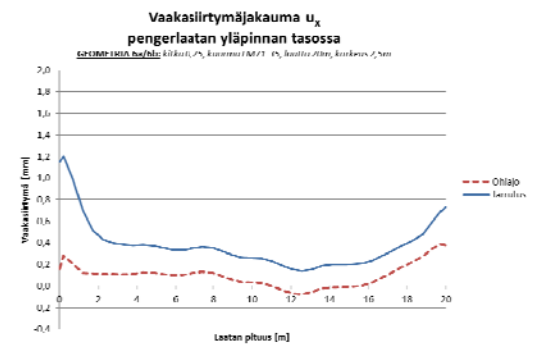
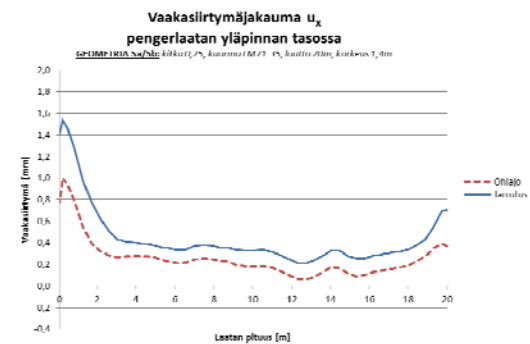
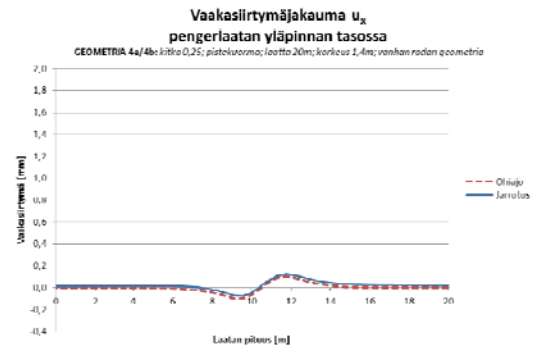
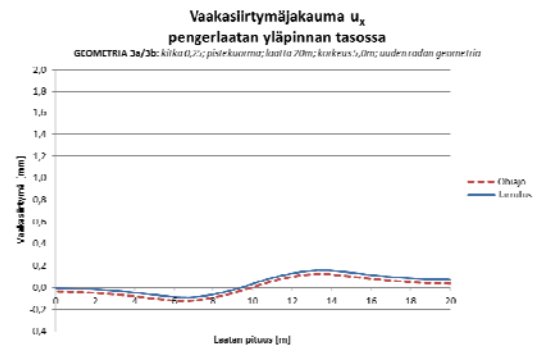
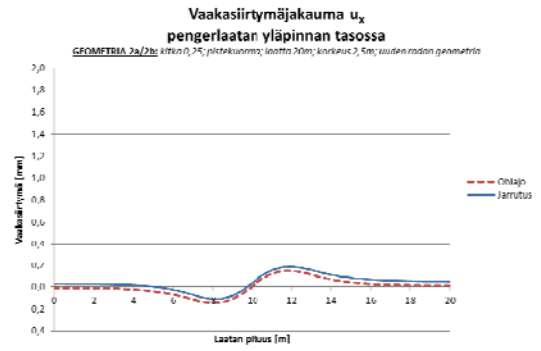
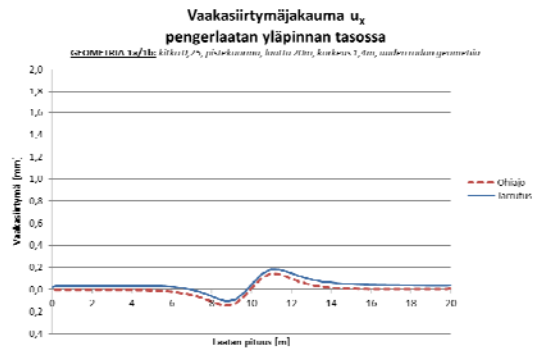
*Ei tuloksia. Pystyjännitysjakautuma ei ole edustava [kts. Liite 3 (6/7)].*

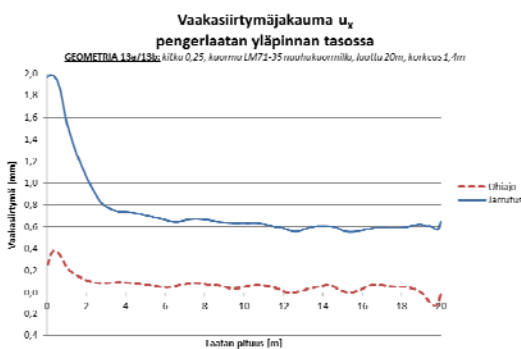
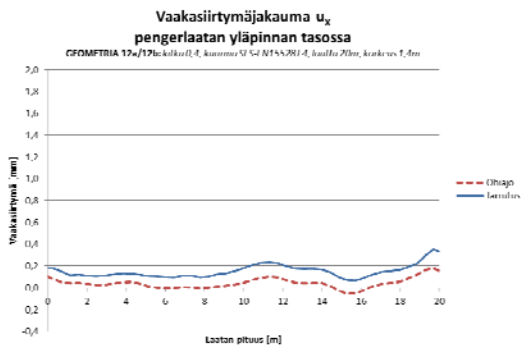
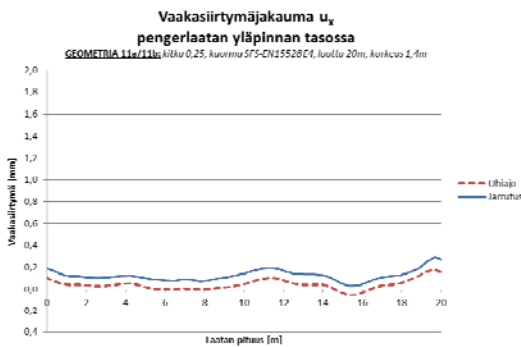
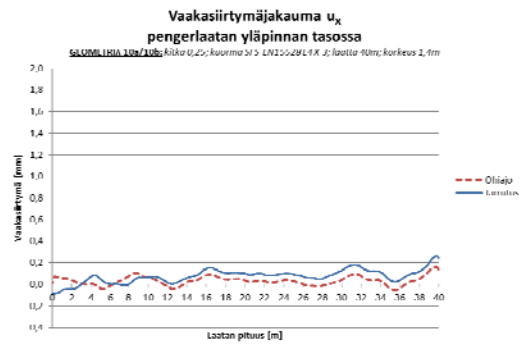
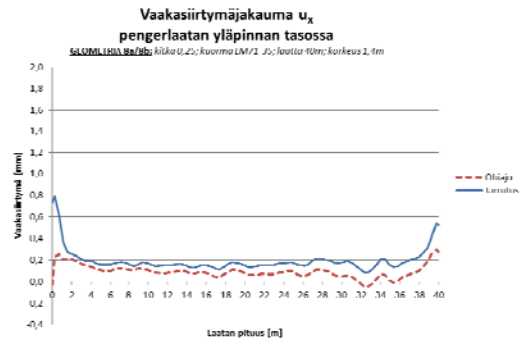
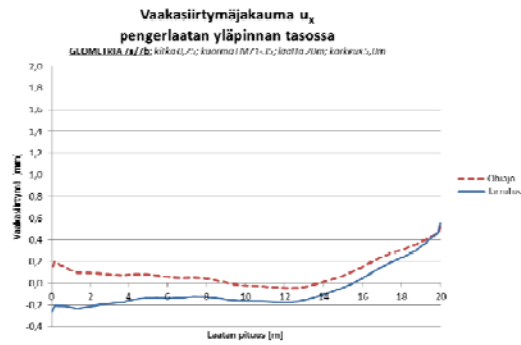
*Ei tuloksia. Pystyjännitysjakautuma ei ole edustava [kts. Liite 3 (6/7)].*

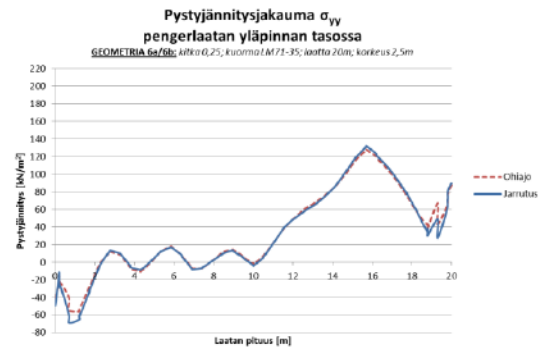
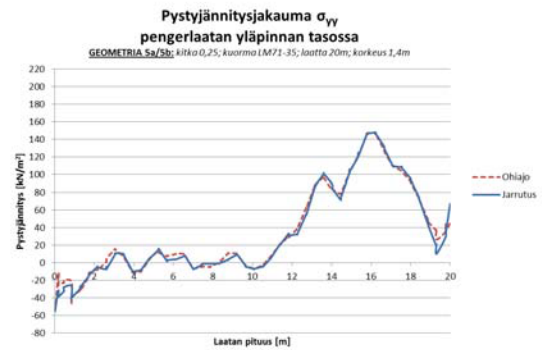
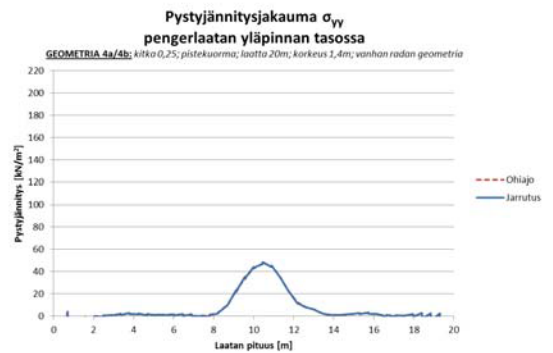
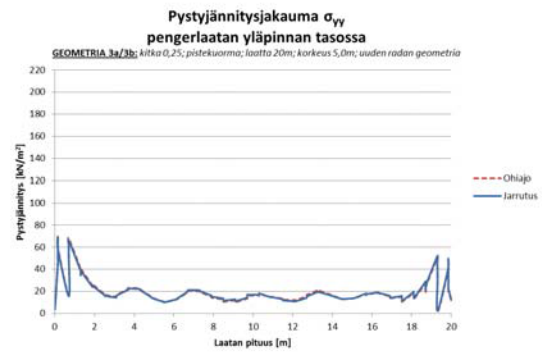
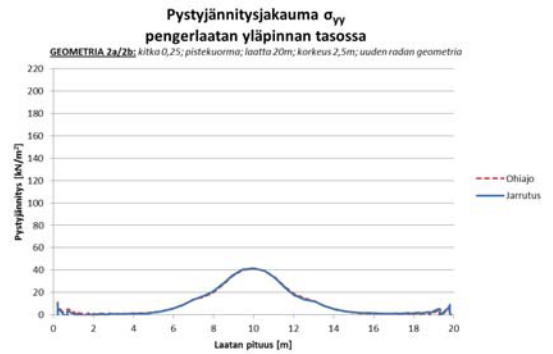
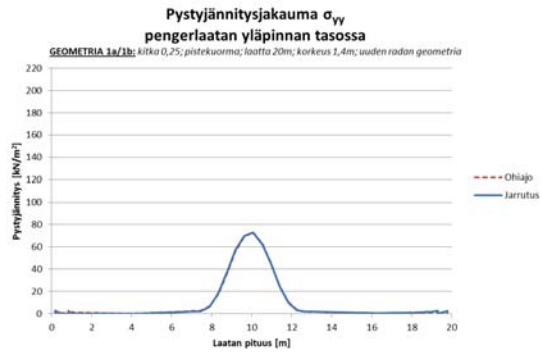


**Pengerlaatan yläpinnan vaakajännityksen osuus ratapölkyn  
alapinnan maksimipystyjännityksestä (Vaihe 14)**

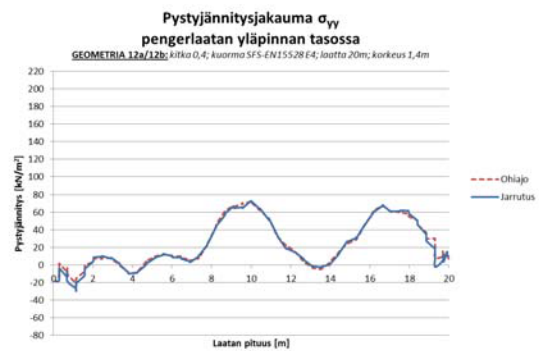
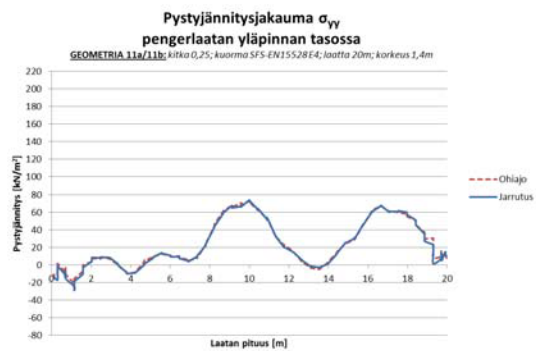
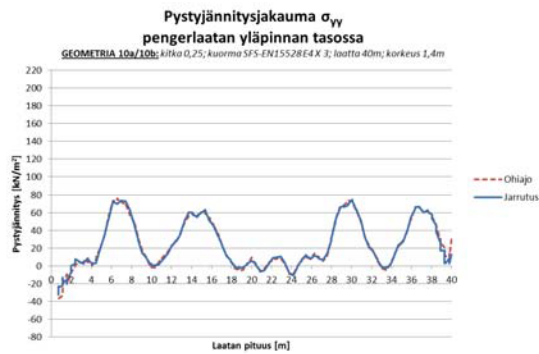
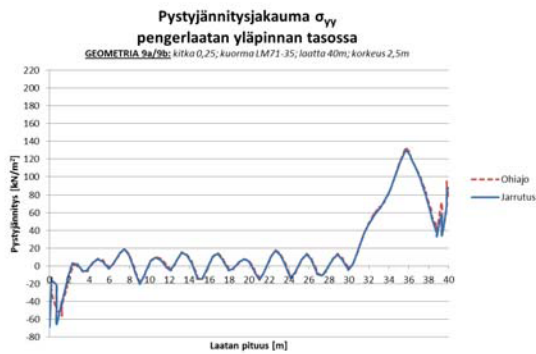
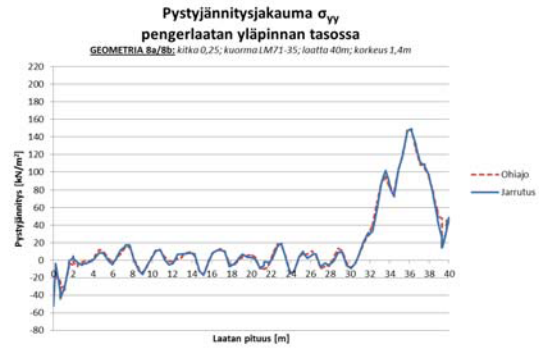






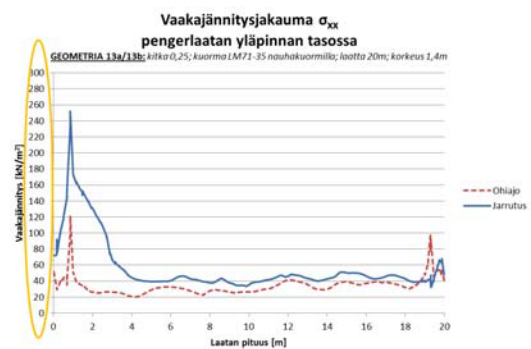
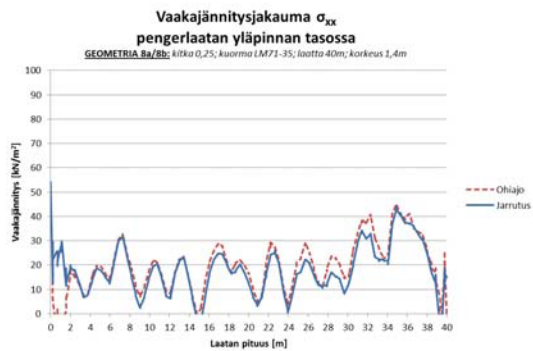






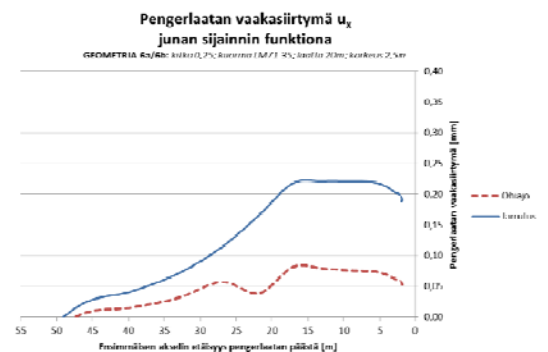
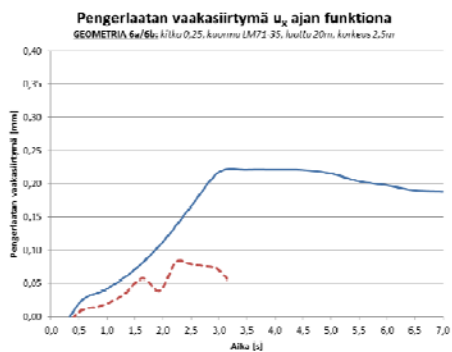
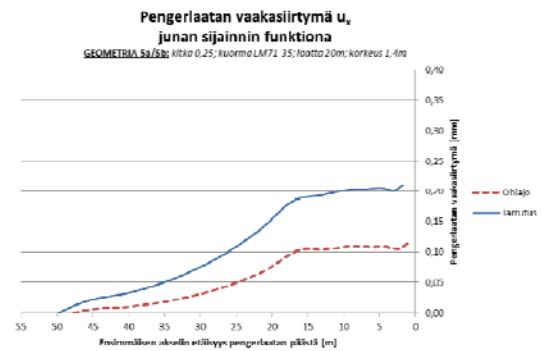
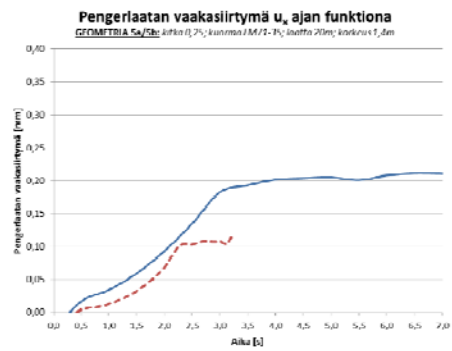


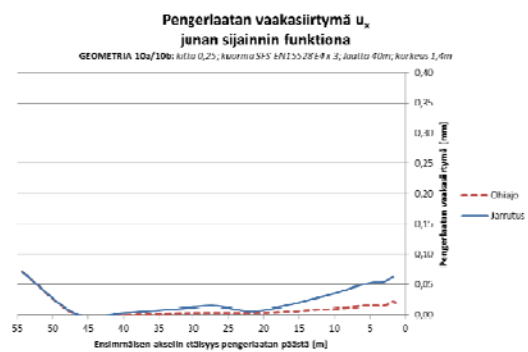
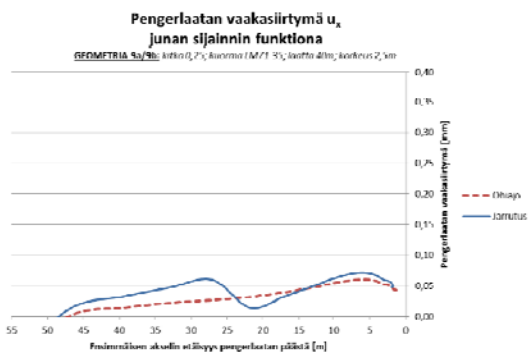
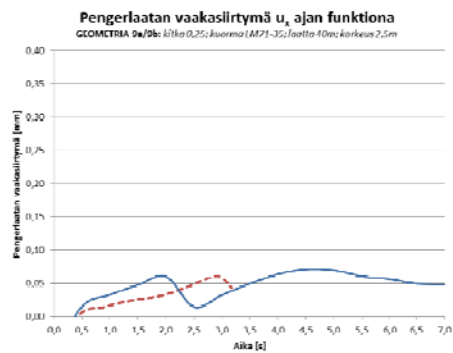
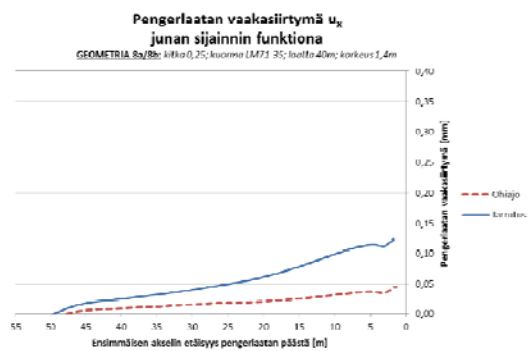
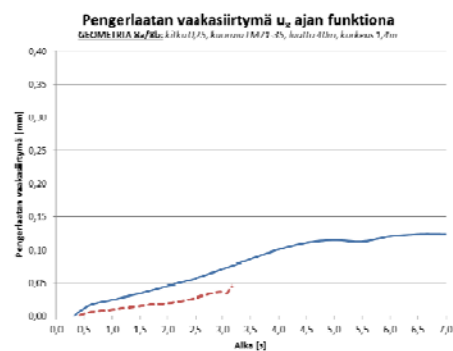
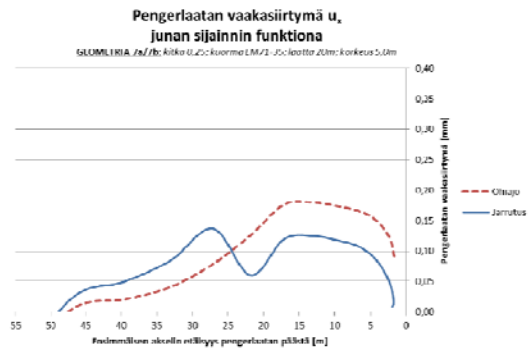
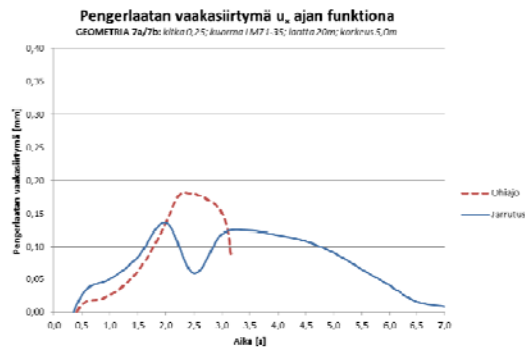


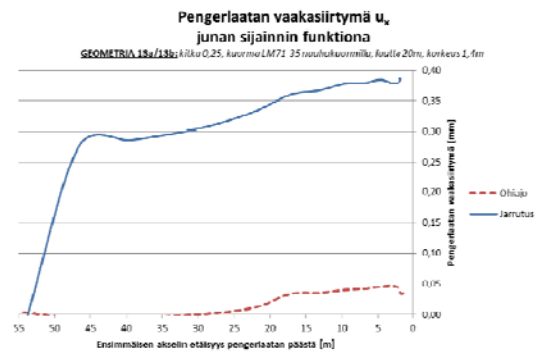
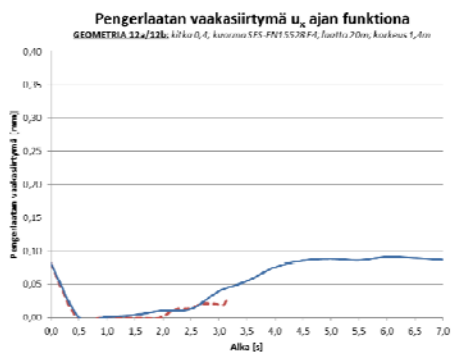


(node)

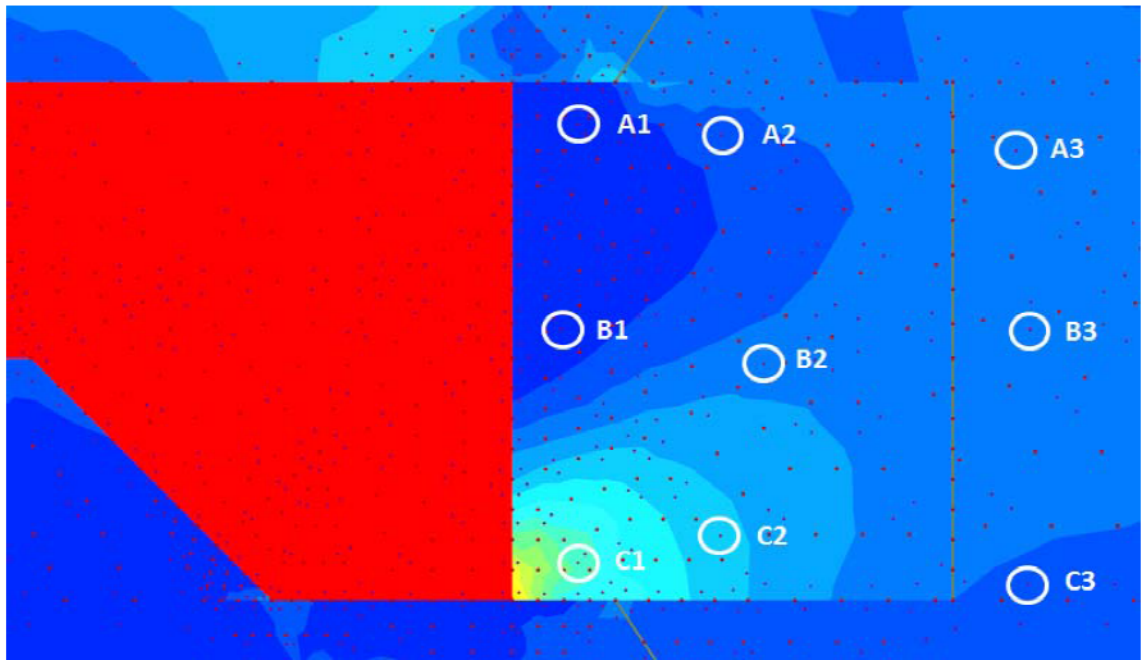
(mesh)





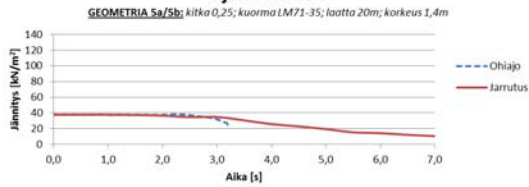




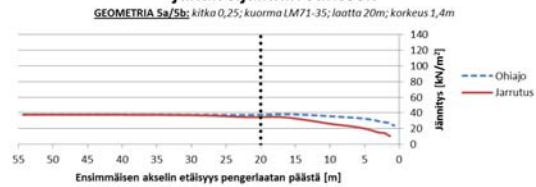


*esitettyjen tulosten ulkopuolelta*

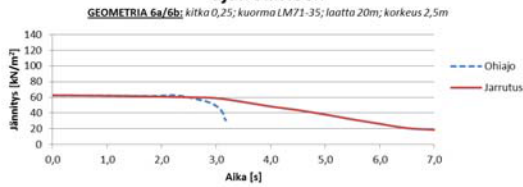
### Pengerlaatan pään keskimääräinen vaakajännitys ajan suhteen



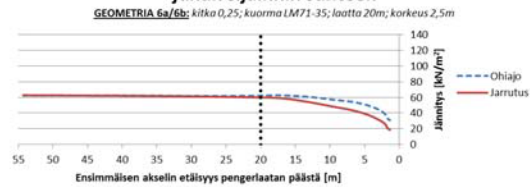
### Pengerlaatan pään keskimääräinen vaakajännitys junan sijainnin suhteen



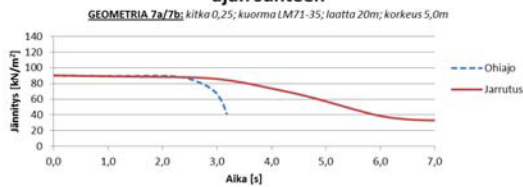
### Pengerlaatan pään keskimääräinen vaakajännitys ajan suhteen



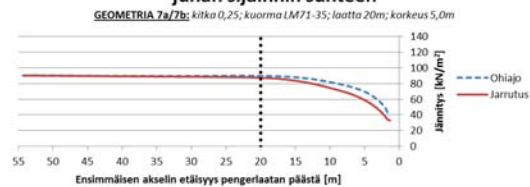
### Pengerlaatan pään keskimääräinen vaakajännitys junan sijainnin suhteen



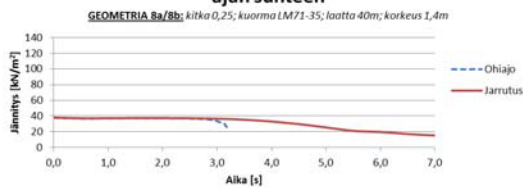
### Pengerlaatan pään keskimääräinen vaakajännitys ajan suhteen



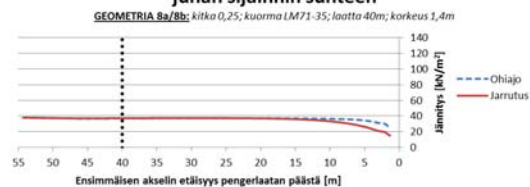
### Pengerlaatan pään keskimääräinen vaakajännitys junan sijainnin suhteen



### Pengerlaatan pään keskimääräinen vaakajännitys ajan suhteen

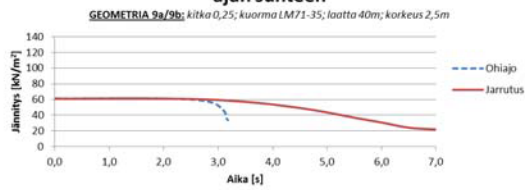


### Pengerlaatan pään keskimääräinen vaakajännitys junan sijainnin suhteen

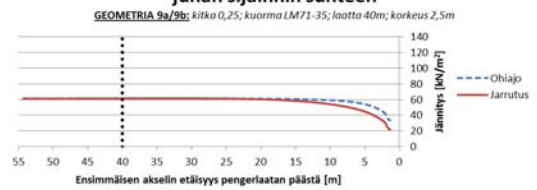




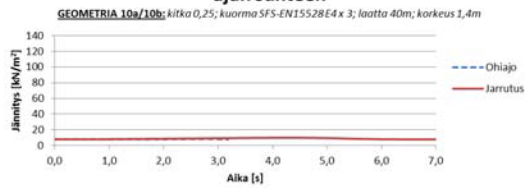
**Pengerlaatan pään keskimääräinen vaakajännitys  
ajan suhteen**



**Pengerlaatan pään keskimääräinen vaakajännitys  
junan sijainnin suhteen**



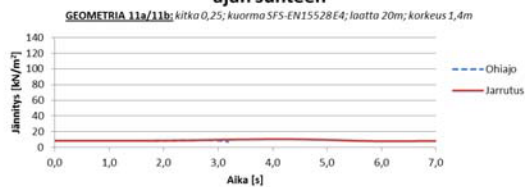
**Pengerlaatan pään keskimääräinen vaakajännitys  
ajan suhteen**



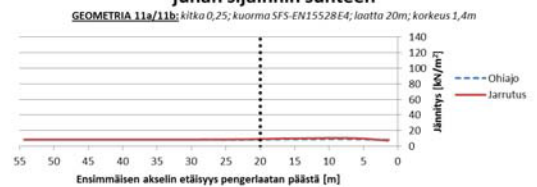
**Pengerlaatan pään keskimääräinen vaakajännitys  
junan sijainnin suhteen**



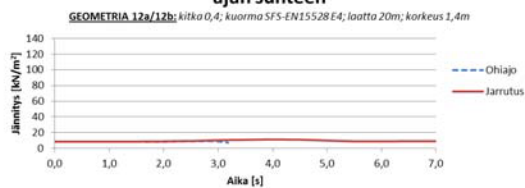
**Pengerlaatan pään keskimääräinen vaakajännitys  
ajan suhteen**



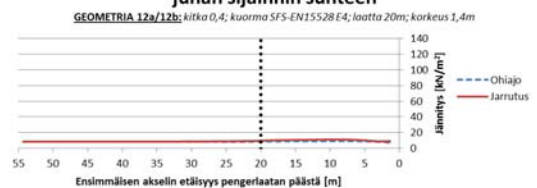
**Pengerlaatan pään keskimääräinen vaakajännitys  
junan sijainnin suhteen**



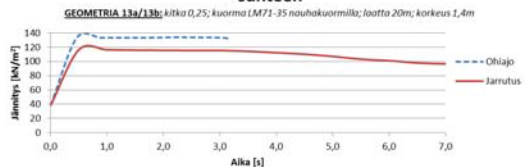
**Pengerlaatan pään keskimääräinen vaakajännitys  
ajan suhteen**



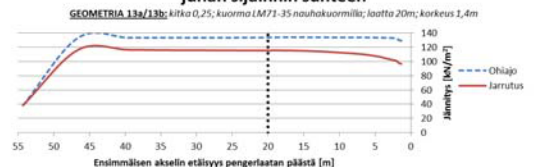
**Pengerlaatan pään keskimääräinen vaakajännitys  
junan sijainnin suhteen**



**Pengerlaatan pään keskimääräinen vaakajännitys ajan  
suhteen**



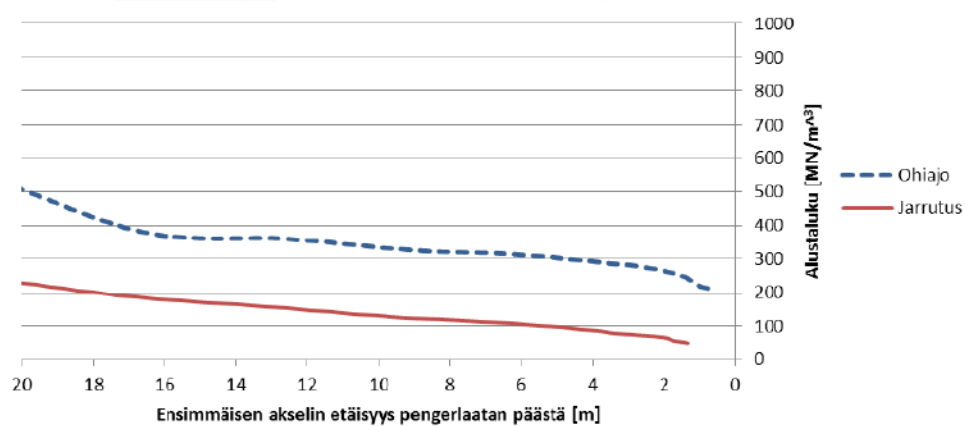
**Pengerlaatan pään keskimääräinen vaakajännitys  
junan sijainnin suhteen**





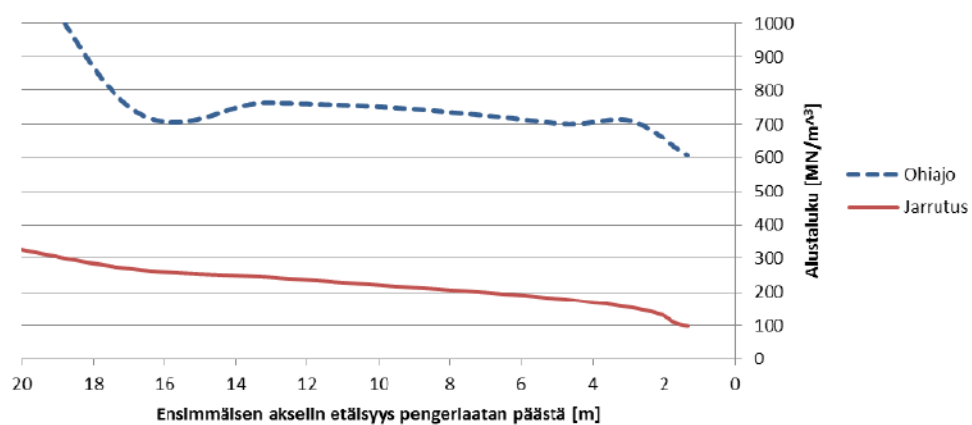
### Pengerlaatan vaakasuuntainen alustaluku $c_m$ junan sijainnin funktiona

**GEOMETRIA 5a/5b:** kitka 0,25; kuorma LM71-35; laatta 20m; korkeus 1,4m



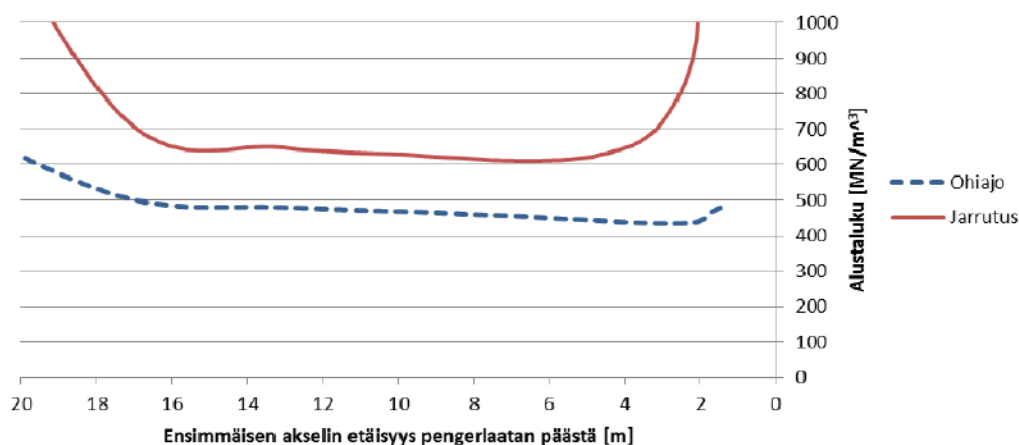
### Pengerlaatan vaakasuuntainen alustaluku $c_m$ junan sijainnin funktiona

**GEOMETRIA 6a/6b:** kitka 0,25; kuorma LM71-35; laatta 20m; korkeus 2,5m



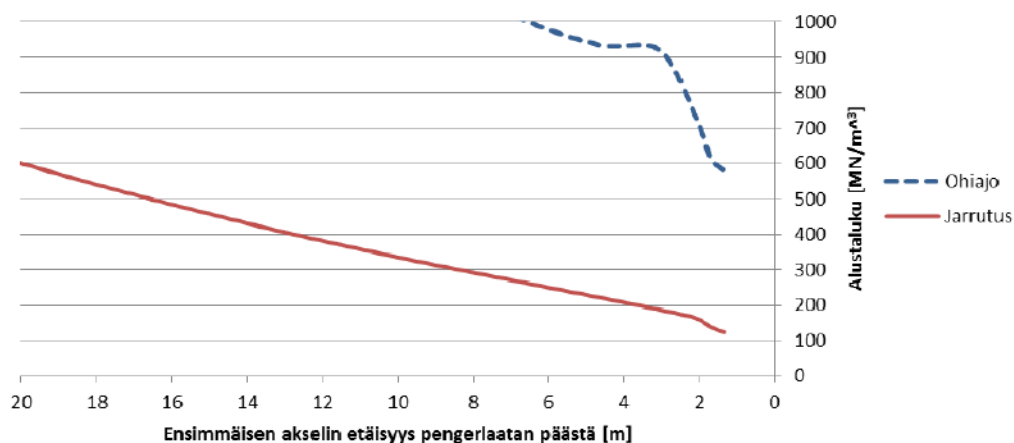
### Pengerlaatan vaakasuuntainen alustaluku $c_m$ junan sijainnin funktiona

**GEOMETRIA 7a/7b:** kitka 0,25; kuorma LM71-35; laatta 20m; korkeus 5,0m



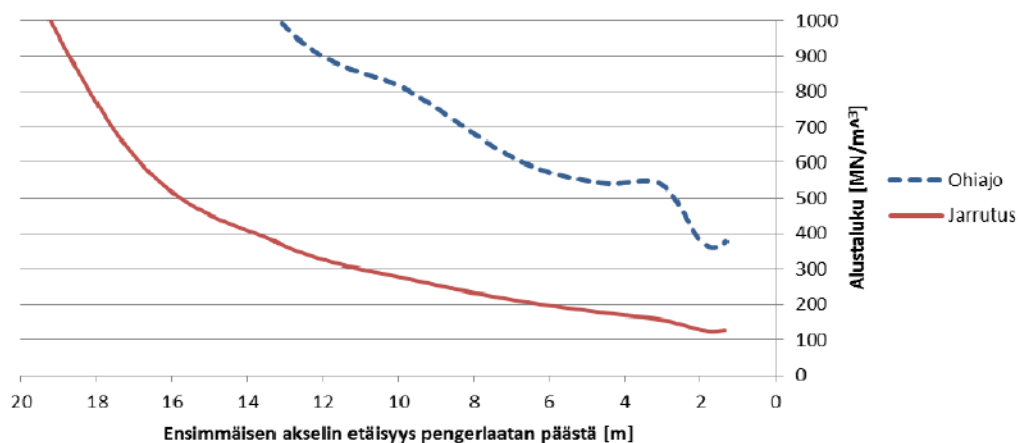
### Pengerlaatan vaakasuuntainen alustaluku $c_m$ junan sijainnin funktiona

**GEOMETRIA 8a/8b:** kitka 0,25; kuorma LM71-35; laatta 40m; korkeus 1,4m



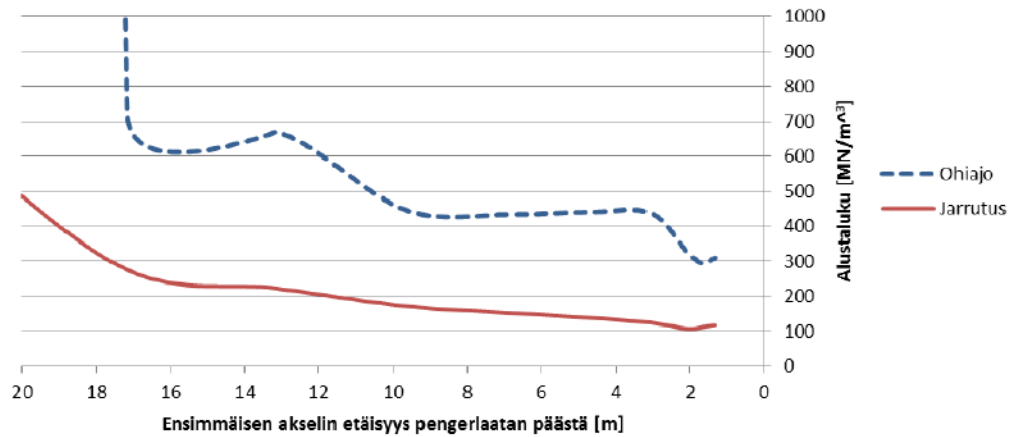
### Pengerlaatan vaakasuuntainen alustaluku $c_m$ junan sijainnin funktiona

**GEOMETRIA 10/10b:** kitka 0,25; kuorma SFS-EN15528 E4 x 3; laatta 40m; korkeus 1,4m



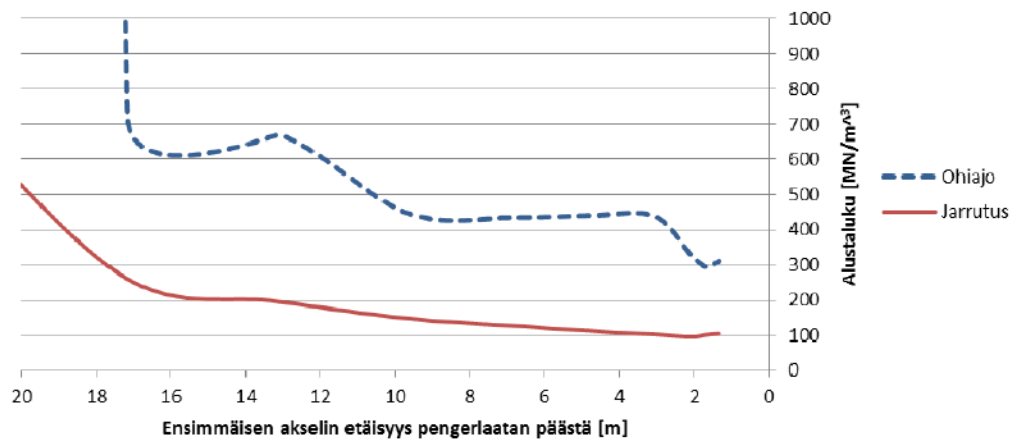
### Pengerlaatan vaakasuuntainen alustaluku $c_m$ junan sijainnin funktiona

**GEOMETRIA 11a/11b:** kitka 0,25; kuorma SFS-EN15528 E4; laatta 20m; korkeus 1,4m



### Pengerlaatan vaakasuuntainen alustaluku $c_m$ junan sijainnin funktiona

**GEOMETRIA 12a/12b:** kitka 0,4; kuorma SFS-EN15528 E4; laatta 20m; korkeus 1,4m



### Pengerlaatan vaakasuuntainen alustaluku $c_m$ junan sijainnin funktiona

**GEOMETRIA 13a/13b:** kitka 0,25; kuorma LM71-35 nauhakuormilla; laatta 20m; korkeus 1,4m

